安全性と開発効率を考慮した災害対応ロボットの実用化の方策に関する研究

五十嵐 広希

電気通信大学大学院電気通信学研究科

博士(工学)の学位申請論文

2015年3月

安全性と開発効率を考慮した災害対応ロボットの実用化の方策に関する研究

博士論文審査委員会

主査　田中　一男　教授

委員　下条　　誠　教授

委員　長井　隆行　教授

委員　明　　愛国　教授

委員　松野　文俊　教授(京都大学)

Studies on practical applications of disaster response robots considering safety and development efficiency

Hiroki IGARASHI

Abstract

Although disaster response robots have been expected to be used for practical purpose, there have been few such successful cases in Japan. Based on such background, this paper studied the following three topics with respect to practical applications of disaster response robots.

Firstly, we proposed the security guideline for demonstration experiments which are aimed to evaluate the practical use of disaster response robots.

Secondly, we developed a disaster response robot constructed with modularized hardware and software components to improve efficiency of the development.

Finally, we carried out the radiation resistant experiments of sensors which are used for autonomous locomotion functions of disaster response robots, and evaluated the necessary specifications of them.

安全性と開発効率を考慮した災害対応ロボットの実用化の方策に関する研究

五十嵐 広希

概要

本論文では，安全性と開発効率を考慮した災害対応ロボットの実用化の方策を提案している．災害対応ロボットは，早くから実用化が期待されてきた．しかし，日本では新たな産業を生み出すまでには至っていない．そこで，災害対応ロボットの実用化を焦点に，次の3点について研究を行った．まず，災害対応ロボットの基本機能の一つである移動機能の評価を目的とした実証実験における安全指針の提案を行っている．次に，災害対応ロボットの開発の効率化を目的に，部品や機能をモジュール化した研究開発用の災害対応ロボットを構築している．最後に，災害対応ロボットの自律移動に用いられるセンサモジュールの放射線照射試験を実施し，適用限界などの耐放射線性能を明らかにしている．

第1章では，研究の背景について述べている．製品開発のための研究，研究成果の実用化，開発した製品を市場に投入する事業化に至るまでの過程には「魔の川」や「死の谷」と呼ばれる，研究や開発が停滞する時期があると言われている．このような時期を早期に脱し，効率的に事業化を進めることが求められている．サービスロボットは，2000年ごろから研究成果が社会を動かすほどの，産業化まで成長することが期待されてきた．サービスロボットの中でも災害対応ロボットは，用途が具体的であり，社会的ニーズも大きく，早くから事業化や産業化が期待されてきたが，現状ではこのレベルには至っていない．特に，2011年に発生した東日本大震災を契機に，災害対応ロボットの実用化や事業化のための研究開発が益々活発になってきている．しかし，多くの事例が未だ「魔の川」や「死の谷」に留まっており，研究成果を早期に実用化することが課題となっている．そこで，災害対応ロボットの研究成果の事業化のボトルネックとして，

実用化フェーズにおける実環境での実証実験中の安全性確保の困難さ，開発において信頼性を低下させることなく短期間でロボットの仕様変更や改良を実施する困難さ，実運用に耐えうるセンサの選定とそれらの情報共有の困難さを挙げ，これらを解決することが本論文の目的と述べている．

第 2 章では，災害対応ロボットの実証実験における安全性確保のための方策について提案している．研究開発途中の災害対応ロボットの実証実験において，製品開発と同等な安全管理を実施することはプロセスが煩雑になり，研究開発に支障をきたす可能性がある．また，安全管理が実施されている場合においても，研究者の経験により暗黙知的に実施されることが多い．そこで，災害対応ロボットの基本機能の一つである移動機能に焦点を当て，移動ロボットの公共空間における実証実験を実施するために必要な安全上の課題を，国際標準規格に基づいて明確化し，その課題を解決する方策を提案している．さらに，移動ロボットの実証実験の一つである「つくばチャレンジ」を事例として，提案した方策の有効性を評価している．

第 3 章では，災害対応ロボットの研究フェーズから実用化への隔たりの問題について述べ，効率の良い開発方法について考察している．未知の環境で用いられることが多い，災害対応ロボットにおける模索的な開発の迅速化を目指し，現場の環境に合わせてデバイスや機能を挿げ替えることを可能とするハードウェアおよびソフトウェアのモジュール化と再利用性を考慮した開発方策を提案している．さらに，他の研究開発用移動ロボットの開発事例と比較し，提案する開発方策の有効性を検証している．

第 4 章では，災害対応ロボットの実用化において考慮すべき開発情報の共有が困難である問題について述べ，その解決策を提案している．災害対応ロボットには，走破性能だけでなく防塵・防水などの耐環境性をはじめいくつかの基本機能が必要となる．その中でも，放射線耐性に関する情報は不足している．研究開発時に考慮していない機能を，実用化の段階になってから検討するのでは，非常に非効率である．また，電子部品の放射線性能評価には多額のコストと多くの時間を要する．このため，放射線性能評価情報は，開発企業のノウハウとなり情報が共有されにくい．そこで，災害対応ロボットの自律移動機能などに多用されている 4 種類のレーザーレンジセンサモジュールに対して実際に放射線照射試験を実施し，耐放射線性能を検証し，その実験結果をまとめている．さらに，実験結果より確認された個々のセンサによる異なる破損特性について，移動ロボットの各機能の信頼性に与える影響について考察し，取るべき方策について検討している．

第5章では，本研究で得られた成果をまとめ，今後の課題や展望について述べている．

内容

図 目次

表 目次

第1章 序論

1.1 はじめに

サービスロボットは，2000年ごろから産業化が期待されてきた [1] [2] [3]．中でも災害対応ロボット [4]は用途や便益が具体的であり，社会的ニーズも大きく，事業化（製品が売れ，事業として成り立たせる状態）や産業化（研究成果が社会を動かすほどの状態）となることが期待されている [5]．しかし，日本では災害対応ロボットが，事業化までに至った事例は少ない．

MOT（Management of Technology）の分野では，研究から事業化までの過程には「魔の川」 [6]や「死の谷」 [7]と呼ばれる，研究開発が停滞する時期があると言われており，これらを効率的に抜ける方策が必要である．サービスロボットの研究開発においては，効率化のための方策として，ハードウェアやソフトウェアなどの部品に対して，インターフェースの標準化 [8] [9]やモジュール化 [10] [11]などが実施されている．生活支援ロボット [12]では，災害対応ロボットと同様に早期の産業化が期待されており，研究段階からの安全性の検証方法 [13] [14]や，事業化に向けた方策の検討 [15] [16]が実施されている．

災害対応ロボットにおいても，標準化や安全性の検証が実施されている [17] [18] [19]が，生活支援ロボットに比べると，災害対応ロボットは未知の環境で動作することが多く，仕様を定めることが困難であり [20]，模索的な研究開発になる傾向が強い [21]．このため，研究成果を実用化するまでに多くの時間やコストをかける必要があり，課題が多い．本研究では，サービスロボットの一つ災害対応ロボットを対象とし，その実用化のための方策に関して考察する．

1.2 サービスロボット

サービスロボットは，主に生活環境で稼動するロボットを指し，工場の中などで稼動する産業用ロボットと区別されている [22]．日本では，2000年ごろからサービスロボットの実用化の期待が膨らみ，2005年にはJISにて，サービスロボットの用語が定義されている（JIS B 0187:2005 [22]）．ここではサービスロボットを「人間にサービスするロボット」と定義しており，サービスロボットの活用されるシーンに合わせて「生活支援」「社会支援」「医療・福祉」「災害対応・

防災・メンテナンス」などに区分された．これらの一部をFig. 1-1に示す．
　近年では，サービスロボットは，少子高齢化社会など社会問題の解決策の一つになりうると期待されている．経済産業省およびNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の予測では，ロボット産業は2035年には9.8兆円に成長し，そのうち5兆円をサービスロボットが占めるとされている [23]．しかし，現在のところ，経済産業省の調べでは2011年のサービスロボット市場は600億円にとどまっている状況である．この中には，物流業界向けの無人搬送車も含まれており，前記のようにサービスロボットの分野に限るとさらに規模は小さく，今後の拡大が期待される．

1.3 災害対応ロボットと事業化の必要性

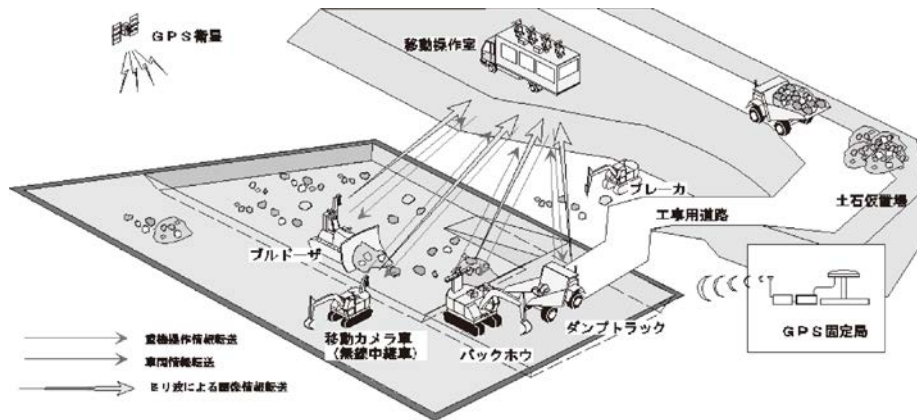
　災害対応ロボットは，自然災害や産業災害時に，無人化施工機械を含む陸上移動調査・作業ロボット（UGV：Unmanned Ground Vehicle），水中移動調査・作業ロボット（UMV：Unmanned Maritime Vehicle），無人飛行ロボット（UAV：Unmanned Aerial Vehicle）などにより，人が行うことが困難であり，危険性が高い，あるいは不可能な作業，情報収集，調査，工事を実施するロボットであり，用途やニーズが明確である．このため，サービスロボットの中でも，早期の実用化が期待されてきた [24]．しかし，日本では災害対応ロボットの技術的に実用化が図られても，運用まで踏まえた事業化や産業化は難しい状態である [25]．
　日本での災害対応ロボットは，1995年の阪神淡路大震災や，1999年の東海村JOC臨界事故を契機に，数多く開発されてきた（ [26] [27]）．また，1990年の雲仙普賢岳での火砕流後に適用された無人化施工機械（Fig. 1-2 (a)）は，災害が発生していない平時の環境でも運用されている数少ない事業化事例である．これらは，2011年3月11日に発生した東日本大震災の影響により発生した，福島第一原子力発電所事故の復旧活動でも活用されている．
　米国においては，2001年9月11日に発生したアメリカ同時多発テロ事件（以下，同時多発テロ事件）の捜索活動において，災害対応ロボットの有効性が確認されたことなどにより研究開発が加速した [28]．さらに，この同時多発テロ事件がきっかけとなって，2001年よりアフガニスタン紛争が始まり，PackBot（iRobot社） [29]（Fig. 1-2 (b)）やTalon（Qinetiq社） [30]（Fig. 1-2(c)）などの多くのUGVが事業化・産業化されている．これらの一部のUGVは，サッカーロボットを題材にした人工知能の開発プロジェクト「RoboCup」の一つの競技として，2000年より「RoboCup Rescue League」がある．ここでは，米国のほかに，日本，ドイツ，イラン，オーストラリア，タイなどの世界中の研究者が参加し，技

術の発展に寄与してきた．

先に述べた，福島第一原子力発電所事故では，PackBotなどの海外で事業化されたロボットが，福島第一原子力発電所事故の初動の調査活動において活用されたのに対して，初動で活用できる日本のロボットが少なかったことが課題となった [31]．米国をはじめ諸外国では，軍事市場や警備・警察などでの利用を前提に，軍事用途を主目的とした災害対応ロボットが開発されており事業化・産業化が先行している．一方，日本では諸外国と同等な技術はあるが，軍事市場が国内に限定され，さらに軍事用途の研究・開発には制約が多く，軍事利用での事業化は難しいなどの特殊性がある．

このため，民間が主体となり「産業競争力懇談会」の分科会が設置され，政府や国や各省庁と連携した「災害対応ロボットセンター」 [5]の設立・設置や，研究・開発，平時の運用や訓練，デュアルユース（民生用と軍事用との両用）の活用も含め，研究開発や調達を促進し，センターの継続的運営が可能となるような事業化のモデル構築をする取り組みが進められている状態である [32].

Fig. 1-1: Example of service robots

(a) [33] [34] [35], (b) [36] [37] [38], (c) [39] [40] [41], (d) [21] [42] [43]

(a) Unmanned construction system

(b) PackBot (c) Talon

(d) Unmanned anti-disaster system R&D project (NEDO)

Fig. 1-2 : Example of Disaster response robots.
(a) [33], (b) [29], (c) [30], (d) [34]

1.3.1 災害対応ロボットの平時利用について

災害対応ロボットの多くは，災害時の利用を想定し研究開発されてきたが，日本国内では，消防向けなどごく限られた分野でのみ，事業化が実施されてきた．しかし，製造される災害対応ロボットは，数台程度の受託開発品がほとんどであるために，企業としては事業に参入しにくい状況であった．さらに，消防向けに関しては，自治体の予算が限られているために，積極的な導入には至っていない[5].

一方，米国では軍事産業を中心に，量産化と共に，アフガニスタン紛争以降の実戦からのフィードバックなどにより機能・性能が飛躍的に向上し，導入価格も低下した．このために，警察や警備会社，民間会社などでの導入が進み，事業化から産業化に進んでいる状況である．しかし，日本ではロボットの軍事利用には民意の抵抗と共に，最大の需要先であるはずの，防衛省においては，新規の装備品の導入には複雑なプロセスなどが必要になり，導入が困難な状況となっている［35］[36].

このような状況のため東日本大震災以降は，民間企業や大学，関係省庁らによる産業競争力懇談会（COCN：Council on Competitiveness-Nippon）が中心となり災害対応ロボットの利用促進について検討が実施されている．ここでは，災害対応ロボットの他，無人化施工システムに加えインフラ点検／メンテナンスロボットの併用などの平時での利用を前提，技術的課題，運用上の課題の抽出と，産業競争力を高めるための開発戦略に関する政策提言がまとめられており，以下のような提言がされている［5].

(1) 災害対応ロボットの配備・運用に関する司令塔機能を有する災害対応ロボット利用推進本部を政府のもとに設置
(2) 災害対応ロボットの安全性・信頼性を確保するための災害対応ロボット技術センターの設置

COCNの報告書では，平時を「1991年の雲仙普賢岳の火山爆発災害のような，危険が伴う作業や工事における現場活用や，トンネル，橋梁，高速道路，ダムなどの社会インフラや，化学プラントやコンビナートなどの産業設備の老朽化による事故や，社会インフラや設備の点検・保守でも使用可能である」と紹介している［5]．これらのインフラ点検・メンテナンスロボットの仕様は，災害対応ロボットと近い仕様であり,現時点においては，災害時と平時にそのまま利用できるわけではないが，多少の設計変更で災害時と平時での利用が可能であると考えられる．

また，インフラ点検・メンテナンスロボットの災害時利用も考えられる．一つに，各インフラ点検・メンテナンスロボットの性能を示す評価法の導入と（例えば，[37]），評価法に災害対応ロボットが充たすべき項目を含めることも有効である．さらに，インフラ点検・メンテナンスロボットを用いた災害訓練などの実施も有効であると述べられている [5].

この他に，災害対応ロボットの平時利用として，警備・巡回型のロボットや消防ロボットなども考えられる．これらはサービスロボットでもあり，災害対応ロボットの普及のためには，これらのサービスロボットの災害時の活用方も必要となる．

1.4 研究から産業化までの位置づけと障害

研究開発した成果が，世の中を動かすまでの産業化に至るまでの，イノベーションのプロセスについてはさまざま提案がなされている．研究から産業化までのプロセスを，研究，市場発見，発明・設計検討，詳細設計製造，販売というようなプロセスに分けられており，これらが時間的に順次起きていると考える線形モデルで定式化することがある．一方で，線形モデルでは，現実を反映しておらず，研究は開始時の他にも，下流のいくつかの段階でも現れているとする結合連鎖モデル [38]がS.J.Klineにより提案されている（Fig. 1-3(b)）．線形モデル（Fig. 1-3(a)）の方が理解しやすいなどの側面があるが，実態としては結合連鎖モデルで研究開発が行われ，産業化となる製品が生み出されているといわれている [39].

また，イノベーションのプロセスまでの，研究の位置づけについてより焦点をあて，企業側や研究者側の視点から，整理や枠組みの提案がされている．企業側の視点から，只野らや [40]，植之原 [41]は，研究フェーズを細分化し，基礎研究（純粋基礎研究，目的基礎研究），応用研究，開発/研究（初期研究，後期研究，目的基礎開発，応用開発，実用化開発，製品開発）というような枠組みが提案されている．さらに，基礎研究者側の視点から，研究成果の製品化，事業化の観点から吉川らにより，第1種基礎研究（未知現象より新たな知識の発見・解明を目指す研究），第2種基礎研究（異なる分野の知識を幅広く選択，融合・適用する研究），本格研究（第１種基礎研究から「製品化研究」にいたる連続的な研究）として枠組みが示されている [42].

本論文では，利便性のためにイノベーションまでのプロセスを，「研究，実用化，事業化，産業化」の4つの分け，以下のように定義する．なお，本論文では各プロセスの説明には，利便性のために線形モデルを用いて説明を行う．

- 研究（基礎研究）:
  世の中にないシーズの創出，基礎技術の基盤を技術化のフェーズ
- 実用化（開発，製品開発，試作，応用研究）:
  マーケティングによって製品仕様を絞った製品開発，研究から開発への転換フェーズ
- 事業化（製品化，商品化，商品開発，試作量産，ビジネススタートアップ，製品化研究）:
  開発した製品が売れて事業が成り立つ，マーケティングからセールスに製品を商品にするフェーズ
- 産業化（本格的商業化，工業生産）:
  研究成果が生活様式などを変えるほどの継続的な商品の導入・量産のフェーズ

各プロセスの過程にはさまざまな難しさがあるといわれており，研究と開発の間には「魔の川」や，開発と事業化の間には「死の谷」，事業化と産業化の間には「ダーウィンの海」とした分類がある．魔の川は出川 [6]により提唱され，一つの研究開発プロジェクトが基礎的な研究から出発して，製品化を目指す開発段階へと進めるかどうかの関門のことをさす．死の谷は，米国NIST（アメリカ国立標準技術研究所）のB. M. Lewis [7]により提唱されたもので，技術開発が資金調達の問題から実用化に至らない状態をさし，開発段階へと進んだプロジェクトが，事業化段階へ進めるかどうか決定の際にあらわれる谷として定義されている [43]．さらに，ダーウィンの海は，事業化されて市場に出された製品やサービスが，他企業との競争や真の顧客の受容という荒波にもまれる関門をさす. ここれらを迅速に抜ける方策が必要であり, 基礎研究者側の視点 [42]や，企業側の視点 [44]で方策の提案がされている.

イノベーションまでの各プロセスの課題の解決策に，開発した技術を実際の現場に近い環境で検証する方策があり，実験，実証実験，社会実験，社会実装などがある．本論文ではそれぞれを次のように定義する

- 実験：
  研究者や技術者が研究や開発した技術の成果を確認できる限定的な環境において，研究・開発した成果や技術を確認すること，作業・活動とすること．実用化前のフェーズ
- 実証実験：
  研究者や技術者, システムインテグレーターらが開発した技術の有効性を確認できる環境において，研究・開発した技術の有効性を確認・証明する

こと．模索的な実験．研究フェーズから，実用化フェーズへの橋渡しを行う取り組み．

・ 社会実験（社会実証）：
サービスインテグレーターや事業者などが，開発した技術を導入する公共的な環境で，開発した技術を社会が受容・適合するかの確認をすること．検証的な実験．実用化フェーズから，事業化フェーズへ橋渡しを行う取り組み．

・ 社会実装：
事業者や行政などが，開発した技術を導入する公共的な環境において，社会に導入・適応させる取り組みであり，新規のサービスをプロトタイプすること．検証作業．事業化フェーズから，産業化フェーズへ橋渡しを行う取り組み．

また，各プロセスと各障害との関係性をFig. 1-4に示す．さらに，Fig. 1-1に示したサービスロボットと，Fig. 1-4における位置づけとの関係を示した図をFig. 1-4に示す．Fig. 1-4は，筆者の主観による位置づけであり，事例も多くはないが事業化・産業化に至ったサービスロボットが多くないことがわかる．また，災害対応ロボットの事業化・産業化が軍事産業を除いて，遅れていることもわかる．災害対応ロボットの平時利用も含め，サービスロボットは工業用のロボットと違い，従来存在しない付加価値を有するサービスを提供する必要もある．このためにも，実証実験のような取組を効率的に実施することで，早期に実用化や事業化を実現させる必要がある．

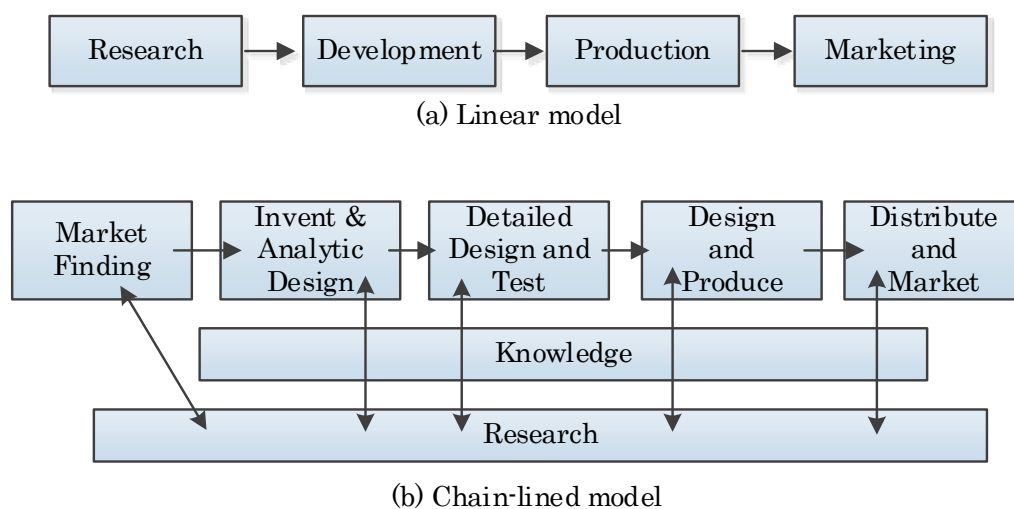



Fig. 1-3: Innovation process of linear model and Chain-lined model [38]

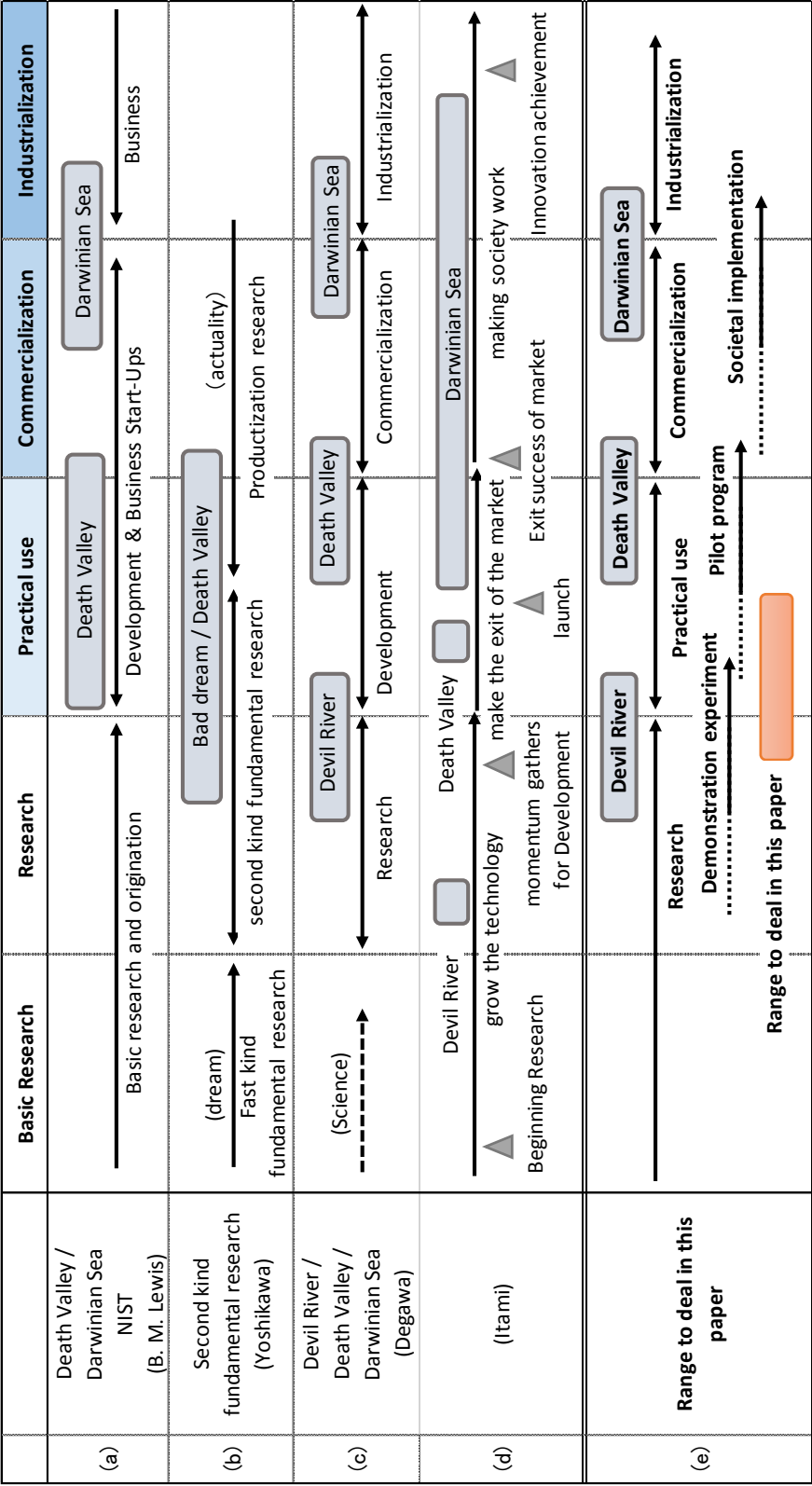



Fig. 1-4: Positioning comparison of each failure and the commercialization stage

(a) [7], (b) [42], (c) [6], (d) [43]

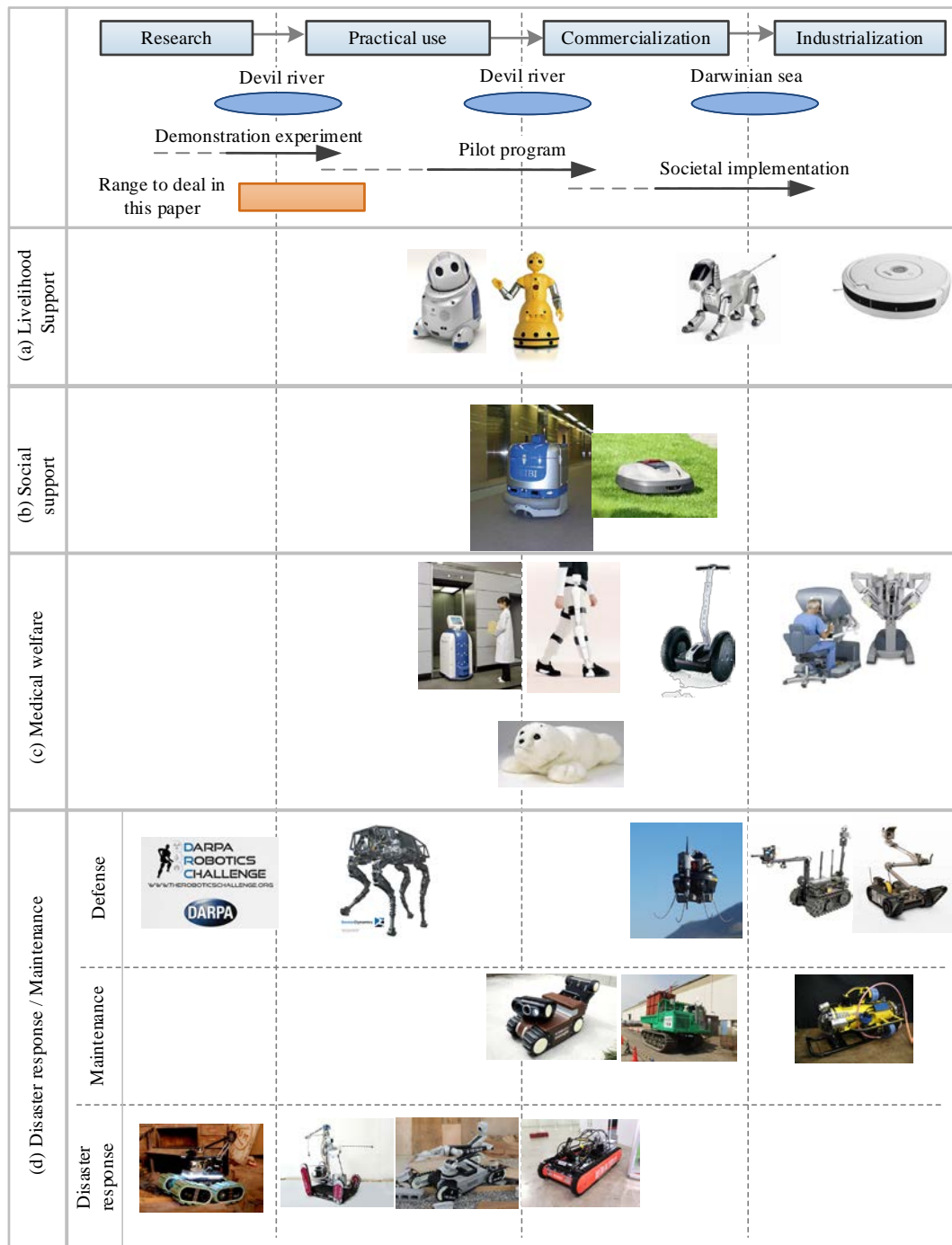



Fig. 1-5 : Positioning of each process and service robots in Fig. 1-1
(a) [45], (b), (c) [46], (d) [21] [47]

1.5 本論文の目的と構成

1.5.1 目的

本研究では，災害対応ロボットの迅速な実用化のために，実用化を見越した研究段階から考慮すべき課題について検討し，それぞれの課題の解決策を提案する．災害対応ロボットの，研究成果の実用化のボトルネックとして，実用化フェーズにおける実環境での実証実験中の安全性確保の困難さ，信頼性を低下させることなく短期間でロボットの仕様変更や改良を実施する困難さ，実運用に耐えうるセンサの選定の困難さを挙げ，これらを解決することを目的とする．

災害対応ロボットは，サービスロボットの中でも開発が遅れている．原因はいくつかあるが，災害が起きていない平時での用途開発の不足による，事業化の遅れなどがある．災害対応ロボットの事業化には，警備・巡回型のロボットなどのサービスロボットの災害時の活用も必要となる．また，複雑な災害現場で必要となる災害対応ロボットの仕様を定めにくいために，実用化の障害となる可能性がある．さらに，災害対応ロボットには，いくつかの充たすべき基本的な機能が必要である．災害対応ロボットに必要な，機能や性能評価の研究は進んでいるが[48] [49]，ロボットに搭載する電子デバイスの耐放射線性能に関する情報が不足しているなどの問題がある．

そこで，開発する災害対応ロボットを事業化する際に必要な，移動ロボットの公共空間での実証実験における安全管理（リスクマネジメント）について，国際標準規格の視点から実験での安全上の課題を整理・明確化し，安全管理方策を提案する．次に，再利用性と開発効率の向上を目的とし，モジュール化したハードウェアを用いて災害対応ロボットのプロトタイプを構築し，ロボット用ミドルウェア（RTミドルウェア）を用いてソフトウェア的にもモジュール化することによるロボット開発の効率化を検討する．最後に，災害対応ロボットの電子部品に必要な基本機能である，移動ロボットのセンサの耐放射線性能について検証を実施し評価を行う．

これにより，災害対応ロボットの開発や実用化，活用が加速し，災害時における安全安心の実現や，インフラや産業設備などの老朽化対策など，社会的な問題の解決に寄与できると考える．

1.5.2 構成

本論文は以下の全5章で構成され，概要は以下の通りである．

第 1 章では，本研究で扱う災害対応ロボットの実用化の課題と必要性，実用化や，災害対応ロボットの定義について整理する．

第2章では，災害対応ロボットの実証実験における安全性確保について考える．研究開発途中の災害対応ロボットの実証実験において，製品開発と同等な安全管理を実施することは煩雑になり，研究開発に支障をきたす．また，安全管理が実施される場合においても研究者の経験値により，暗黙知的に実施されることが多い．そこで，災害対応ロボットの基本機能の一つである移動機能に焦点を当て，移動ロボットの安全性について検討する．はじめに，移動ロボットが公共空間における実証実験を実施するのに必要な安全上の課題を，国際標準規格に基づくリスクマネジメントの視点から，明確化する．さらに，煩雑な安全管理を安全規格の枠組みを元に整理し，研究者でも実施しやすい安全管理方策（リスクマネジメントとリスクマネジメント）を提案する．提案した方策を元に，移動ロボットの実証実験の一つである「つくばチャレンジ」を事例に有効性の評価を行う．

第 3 章では，災害対応ロボットの研究フェーズから実用化への隔たりの問題について述べ，効率の良い開発方法について考察する．災害対応ロボットは，未知の環境で使用されることが多い．このため，環境に合わせて，迅速な開発が必要であるが，模索的な開発となってしまい，開発費や人員，開発時間などの限られたリソースで行うには限界がある．そこで，開発時間などを短縮するために，市販品の製品や他で開発されたソフトウェアモジュールを再利用して開発効率を上げる方策を提案した．この方策を元に，共通プラットフォームとなりえる，研究開発用の災害対応ロボットプラットフォーム「MATOI」を構築し，実証実験により実用性の検証を行った．さらに，他の研究開発ロボットと比較し，開発方策の有効性を検証した．

第 4 章では，災害対応ロボットの実用化において考慮すべき開発情報の共有がされにくい問題について述べ，その解決策を提案する．災害対応ロボットには，走破性能だけでなく防塵・防水など耐環境正などいくつかの基本機能が必要となる．その中でも，放射線耐性に関する情報は不足しており，研究開発時に考慮していない機能を，実用化の段階になってから対応を検討するのでは，非常に非効率である．また，電子部品の放射線性能評価には多額のコストと時間を要する．このため，放射線性能評価情報は，開発企業のノウハウとなり情報が共有されにくい．そこで，災害対応ロボットの自律移動機能などに多用されている 4 種類のレーザーレンジセンサモジュールに対して実際に耐放射線試験を実施し，耐放射線性能を検証した．さらに，実験結果より確認された個々のセンサで異なる破損特性について，移動ロボットの各機能に対しての信頼性に与える影響について考察し，取るべき方策について検討した．

第 5 章では，全体の結論と今後の課題を述べる．

なお，本論文では利便性のために規格は JIS 規格番号を主とし，JIS で制定されてない規格については ISO 規格番号で記載する．

第2章

公共空間などの実環境での実証実験における リスクマネジメントの方策

本章では，移動ロボットの実証実験における安全性確保の課題について述べる．研究開発途中の移動ロボットの実証実験において，製品開発と同等な安全管理では確認・検証作業が煩雑になり，暗黙知的に実施されることが多い．そこで，公共空間などの実環境での実証実験について，国際標準規格に基づく安全管理の視点から，屋外の公共空間における移動ロボットの実証実験での安全上の課題を整理・明確化する．その課題を解決するための安全管理の方策を提案する．提案した方策を元に，移動ロボットの実証実験の一つである「つくばチャレンジ」を事例に有効性を検証する．

2.1. 移動ロボットの事業化を踏まえた実証実験

近年，ヒトが生活する環境で活用することを目的とした，サービスロボットの実証実験が実施されている（例えば，[50]）．サービスロボットは警備ロボット [51] や，搬送ロボットなどの屋内移動ロボットがすでに事業化されており [52]，福祉や介護などの分野でも事業化を目指した実用化の研究・開発が盛んに行われている [53]．これに伴い，移動サービスロボットを実際の利用環境に近い公共空間(一般に開放されている公共の広場や，学校，駅，ショッピングモール，病院などの施設や，車道や歩道を含む道路・街路などの実環境）を用いて，サービスロボットの市場創出性の検証や，技術的な検証，実用化に向けた問題点を検証する実証実験を実施する機会が増えている．

サービスロボットを実用化・事業化する際には実環境での実証実験が必要であり，実証実験を実施することで研究成果の確認を行うと共に，技術面や安全面などで新たな課題を早期に認識するなどが期待できる．しかし，実験の機会が増えることで，ヒトとロボットが同じ空間を共有することになる．これにより，ヒトとロボットとの接触事故が発生する可能性が高くなるため，安全に実証実験を行うためのリスクマネジメントが必要となる [54]．これまで多くの実証実験では「隔離の原則」の考え方を主体とした，ロボットと人との間をパーテーションや，カラーコーンなどで区切った実験がほとんどであった（例えば，Fig. 2-1）．隔離の原則は，機械類の安全性が示されたJIS B9700-1:2004 [55]の5章において，

要求事項が規定されている．サービスロボットは一般的な機械と違い，危険源（機械）を隔離することができず，ヒトと危険源が同じ場所と時間を共有することになる．

2.1.1 医療機器の開発プロセス

ヒトに対し治療などの介入を前提とした医療分野では，最高レベルの安全確認を必要とするため，多くの確認や承認プロセスを実施するリスクマネジメントが整備されている．日本では薬事法を中心に，厚生労働省からは臨床研究に関してが [56]，日本生活支援工学会からは福祉用具の臨床試験に関する倫理審査が整備されている [57]．これらの基本とし，ヒトを用いた研究段階の臨床研究/非臨床試験（GLP）や，実用化に向けた治験制度やヒトを対象とした介入試験を第Ⅰ相～第Ⅲ相の3つのフェーズに分けた臨床試験（GCP）[58]，承認後の製造管理（GMP）などの確認や承認のプロセスが整備されており [59] [60]，実証実験の進め方がリスクマネジメントとして明文化されている．

福祉用ロボットの研究開発でもこれらを参考とした研究や実証実験として，排泄介護支援ロボットを題材とした被験者の保護方策や倫理審査についての検討 [61]や，GCPで示された臨床試験の3つのフェーズを参考にした人支援型ロボット開発のための安全確認手法の提案 [62]や，機械安全の考え方に基づいたサービスロボットに関する実証試験の安全性の評価法 [63]などが報告されている．これらの福祉用ロボットの研究開発は，事業化された場合には医療機器になる可能性があるため，臨床試験に近いリスクマネジメントが行われている．しかし，すべてのサービスロボットに対してこれらと同様なマネジメントプロセスを適用すると，実用化までに多くの時間を必要とするなどの問題がある．

医療機器やサービスロボットなどの一般製品を含む，さまざまな産業・技術分野に対するリスクマネジメントの基本として，日本工業規格（JIS）のJIS Q31000:2010 [64]に指針が示されている．ここではリスクマネジメントを「リスクについて組織を指揮統制するための調整された活動」としており，リスクを組織で系統的に管理し，リスクマネジメントを効率的・効果的に実施する，一般的な枠組みを示している．しかし，実用化・事業化の事例が少ないサービスロボットでは，リスクマネジメントの具体的な枠組みの規格化までには至っていない．

2.1.2 サービスロボットに関する保護方策

サービスロボットに関する保護方策（リスク低減の方策）について活発な議論

が始まったのは，2005年に開催された愛知万博（2005年日本国際博覧会）のころからである．ここでは，一般製品の安全側面に関する規格の導入指針 [13] [65]や，機械類のリスクアセスメントを示したJIS B9702:2000 [66]を中心とした保護方策が提案され実施された．これらを元に，2007年に経済産業省より事業化を目指したサービスロボットの安全性確保のために，リスクアセスメントの実施と必要な保護方策を求めたガイドライン [67]が示されている．さらに，実用化が期待されている搭乗型移動ロボットや装着型ロボットなど，サーボスロボットの安全規格を示したISO13482 :2014 [12]にて安全に関する標準化[1]が検討されている．しかし，研究開発段階の移動ロボットにおいては，公共空間を用いて実証実験を行うための具体的な安全ガイドラインやリスクアセスメントは示されていない．

日本で公共空間を用いたサービスロボットの実証実験を実施する場合，ルールやガイドラインが未整備であるために実証実験の実施者は，実証実験のリスクマネジメントやロボットに対する保護方策，安全上の責任の所在などの課題を個別に考慮している状態である．公共空間を用いた実証実験の一つに，2007年より2011年まで[2], 自律移動ロボットの実証実験「Real World Robot Challenge」（通称：つくばチャレンジ） [68]が開催された．しかし，実証実験のためのルールやガイドラインが無いために，暗黙知を主とした模索的なリスクマネジメントを独自に実施せざるを得なかった [69]．このような暗黙知を主としたリスクマネジメントでは，得られたリスクマネジメントの知識が再利用困難であり，公共空間を用いたサービスロボットの研究開発のスピードが下がる可能性がある．よって本章では，今後の研究開発の促進のためにも，公共空間を用いたサービスロボットなどの実証実験に必要な安全ガイドラインの基本を，規格[3]に基づき形式知化 [70]されたリスクアセスメントとリスクマネジメントの観点から提案する．事業化までのプロセスと，医療分野の研究開発の承認プロセス，各先行研究との関係性を示したイメージ図をFig. **2-2**に示す．

---

[1] JIS Z0002 :2006:「標準化及び関連活動 一般的な用語」において，標準化（Standardization）は，実在の問題又は起こる可能性がある問題に関して，与えられた状況において最適な秩序を得ることを目的として，共通に，かつ，繰り返して使用するための記述事項を確立する活動としている．
[2] 2014年12月時点は，2007年～2011年を第1ステージとし，2012年からは第2ステージとして，現在も継続して実施されている．
[3] JIS Z0002 :2006において，規格（Standard）とは，与えられた状況において最適な秩序を達成することを目的に，共通的に繰り返して使用するために，活動又はその結果に関する規則，指針又は特性を規定する文書であって，合意によって確立し，一般に認められている団体によって承認されているものとしている．

本章では，移動ロボットの実証実験における安全性確保の課題について述べる．研究開発途中の移動ロボットの実証実験において，製品開発と同等な安全管理では煩雑になり，研究開発に支障をきたす．また，安全管理が実施される場合においても，暗黙知的に実施されることが多い．そこで，公共空間などの実環境での実証実験について，国際標準規格に基づくリスクマネジメントの視点から，屋外の公共空間における移動ロボットの実証実験での安全上の課題を整理・明確化し，煩雑な安全管理を，安全規格の枠組みを元に整理し，研究者でも実施しやすい安全管理方策（リスクマネジメントとリスクマネジメント）について提案する．提案した方策を元に，移動ロボットの実証実験の一つである「つくばチャレンジ」を事例に有効性の評価を行う．これにより，実証実験が促進され，移動ロボットをはじめとしたサービスロボットの実用化が加速されることが期待できる．

また，本章で提案する保護方策は，つくばチャレンジ実行委員会とは独立[4]した提案であることを注意しておく．

Fig. 2-1：Example of principle of safeguarding in the demonstration experiment [71] [72]

---

[4] 本論文の内容はつくばチャレンジ実行委員会の承認を得ているものではなく，すべての見解を反映したものではない．

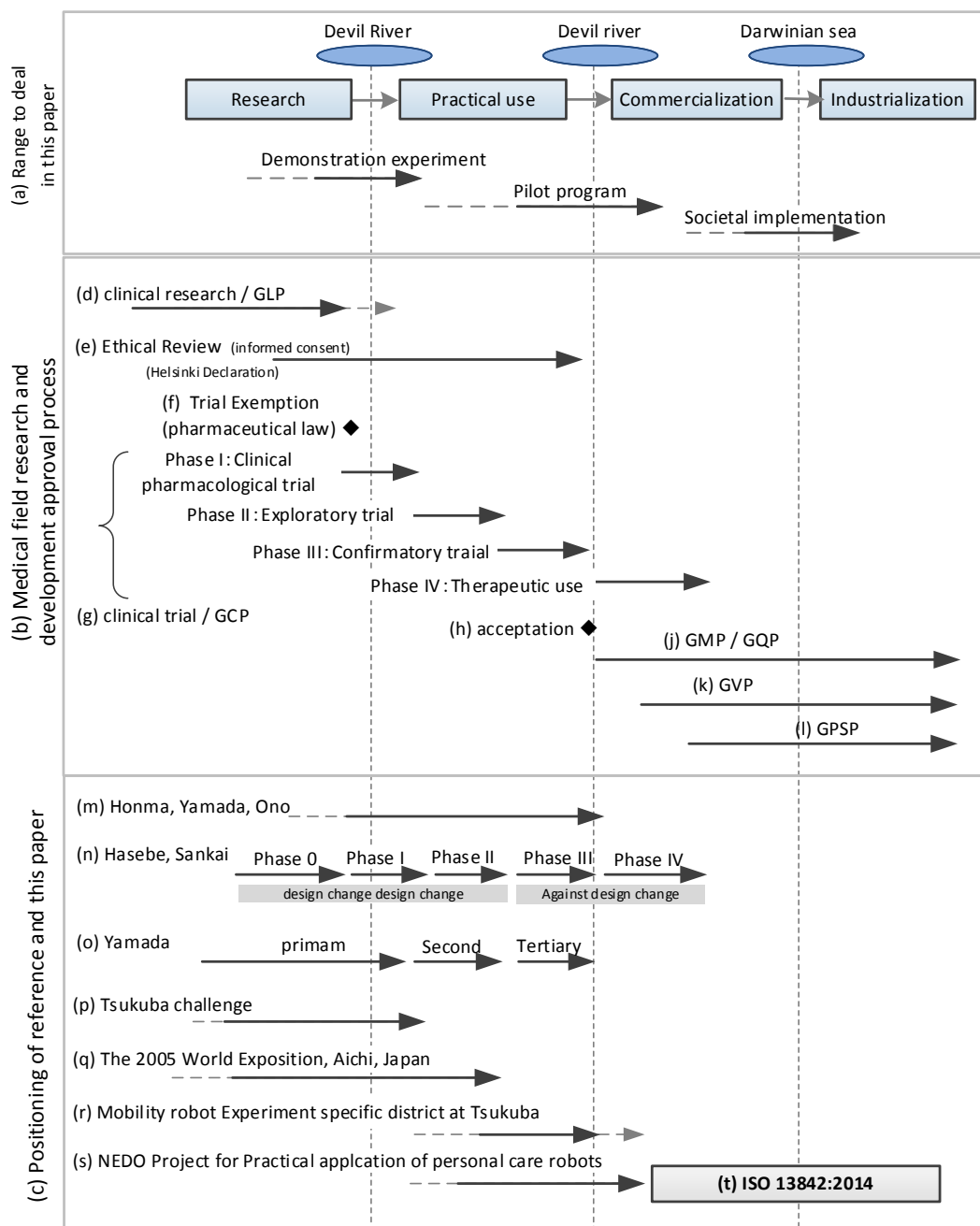



Fig. 2-2 : Positioning of the business process and bibliography
(e) [56], (g) [59] [58] [60], (m) [61], (n) [62], (o) [63], (p) [68], (q) [13], (r) [73], (s) [53], (t) [12]

2.2. つくばチャレンジの事例から見た公共実証実験の安全上の課題

つくばチャレンジの概要と，そこで実施された保護方策（つくばチャレンジでは「安全確保の努力」と表記 [69]）について示す．

2.2.1 つくばチャレンジの概要

つくばチャレンジは，ヒトと自律移動ロボットが共存している公共空間の環境で，ヒトとの親和性を保ちつつ安全に動作するための技術を追求することを目的に実証実験が実施された．この実証実験では，移動ロボットは外部から一切の操作を受けずに，公園内や街路，建物内のコース約1[km]を自律走行することを課題としている．実験場所はヒトや自転車が自由に通行可能で，自動車などが通常走行しない歩道を用いて，毎年数十台のロボットが参加した比較的大規模な実験である．つくばチャレンジの実験の様子をFig. 2-3に示す．

つくばチャレンジでは，多くの移動ロボットが実証実験を行うため，一般のヒトと接触する可能性が高く，ロボットに対して安全性やヒトとの親和性を確保させるために次のような「原則」が設けられた．

Fig. 2-3: Snapshots of Tsukuba Challenge [74]

(1) 環境内にいるヒトに危害を加えないこと．また，恐怖感や強い不快の念を与えないこと．
(2) 環境内に存在する物等に障害や大きな改変を与えないこと．
(3) 環境内にいるヒトの行動を邪魔しないこと．また，環境内に存在する物の動作を妨害しないこと．

この原則を元に，ロボットの仕様(サイズや重量)が「厳守事項」として規定され，主なロボットの仕様に関する規定は次の通りである．

(1) ロボットの進行方向の横幅は75[cm]以内，長さは120[cm]以内，高さは最高部で150[cm]以内，重量は100[kg]以下であること．
(2) 走行時の最高速度は4[km/h]以下であること．
(3) 誰が見てもわかる非常停止スイッチを搭載していること．
(4) 危険な突起部分を有さず，また高温の露出部がない形状であること．
(5) 動作中に騒音・振動等を発生しないこと．
(6) 動力により走行する時はロボットの異常や危険に即時対応できるオペレータ等が常時同行すること．

厳守事項(1)のロボットの横幅は，二台のロボットが一方のロボットを「追い越し」または「すれ違い」を行う際の，ロボット同士の衝突や，ロボットが並ぶことで道幅を狭め一般の通行者の進路を塞がない配慮から設定された．その他のロボットの長さや高さ，重量については，実験へ参加を予定していた実験参加者が利用を想定していた，福祉車両（ロボットの移動プラットフォーム）の最大サイズに合わせて設定された．厳重事項(2)は，安全面より人が歩く速度と同等程度の4 [km/h]以下となった．厳守事項(3)は，実験に参加するロボットは研究開発途中のロボットも含むため，ソフトウェアの不具合による誤動作などを想定し，第三者でもロボットを停止できるような配慮からである．

これらの原則や厳守事項は，実験主催者（つくばチャレンジを実施するために組織された財団法人や自治体，実証実験に参加する大学・研究機関・企業の研究者などの一部の実験参加者を主なメンバーとした「つくばチャレンジ実行委員会」）を中心に協議策定されたものである．

2.2.2 つくばチャレンジにおける保護方策

前項に示した，つくばチャレンジの安全性やヒトとの親和性を確保するための原則を元に「安全確保の努力（保護方策）」が実施された [69]．主な保護方

策を下記に示す.

(1) 実証実験を競技としない：実環境での実証実験が目的であり，コースを早く走ることや，技術の優劣を競うためのコンペティションとしない.
(2) 安全のための遵守事項を規定：安全のためのロボットのサイズや，ロボットの移動速度の制限（最高時速4[km/h]以下）を設定し，非常停止スイッチを設置し，ロボットに突起物を有しない形状にする.
(3) 運営による安全性の確保：すべてのロボットに対する安全性確認（車検）実施や，各ロボットに安全管理責任者を設け随行させ，ロボット走行時にオペレータを随行させるなど.
(4) すべてのロボットの安全性確認を実施：ロボットが遵守事項に沿っているかを，ロボットの開発者と安全性確認を実施する実行委員側と共に確認する.
(5) 環境への手当：コース上に幹線道路をまたぐ歩道橋があり，橋の欄干にロボットが衝突した場合を想定し，ロボットの部品の落下を防ぐネットを設置し，市民や通行人に対して実験実施中の看板を設置し，交差点には注意喚起のために人員を配置する.

また，上記の他に以下のような保護方策などがとられた.
- 公道を用いるために警察に対して道路を安全に使用する説明を行い，道路使用許可を得たうえで実験を実施
- 市民などに対しホームページなどで事前に実験実施を告知
- 実験の様子を見る観客が過度に集中しないようにするため，実験実施の宣伝を控える
- 実験主催者により保険（いわゆるイベント保険）への加入

2.3. リスクアセスメントと保護法策の課題

ここでは，つくばチャレンジの事例より，公共空間を用いた複数の移動ロボットが参加する実証実験のリスクアセスメントと，保護方策が必要とされる安全上の課題について整理する.

2.3.1 リスクアセスメントの課題

つくばチャレンジのような公共空間を用いた実験では，一般機械の実験とは

違い子供や自転車など環境側に不確定要素が多く，リスクアセスメントのための使用環境の固定がしにくい．一般機械のリスクアセスメントが示されたJIS B9702:2000では，初めに機械の使用者や利用場所，環境などを決める「機械類の制限の決定」を行う必要がある．しかし，公共空間では使用環境のパラメーターが多く，すべてに対応したリスクアセスメントを行うことは手間が増える問題がある．また，用途が明確に定まっていない研究開発段階のロボットは，設計仕様を固定することが困難である．なぜなら，つくばチャレンジのようなフェーズでは，研究活動としての実証実験であり，実験中のいわゆるトライ・アンド・エラーに基づく改定が十分考えられるからである．よって，設計仕様が一定の範囲内で改変されることを前提としたリスクアセスメントを行う必要がある．

2.3.2 保護方策の課題

機械類の保護方策を示したJIS B9700-1:2004 [55]においてリスク低減は，機械が使用される環境を確定（使用上の制限，空間上の制限，時間的制限）させ，リスクアセスメントを実施する．その結果を元に，設計者が保護方策（3ステップメソッド [55] : (1)本質的安全設計方策，(2)安全防護・付加保護方策，(3)安全上の情報の提供）[5]を順に講じることで実現するとされている．しかし，研究開発中の移動ロボットに対して製品並みの技術的な保護方策を実施することは時間やコストの面から困難である[6].

また，実験途中にやみくもに環境を改変することは，実証実験の本来の意味を失う可能性があることや，一度実施したリスクアセスメントを再度実施する必要があり，あまり環境に手を入れることは望ましくない．さらに，実験の特徴として，屋内のような閉鎖環境と比べると，自動車や自転車など運動エネルギーが高い物体が多い．なお，一般論として実験参加者の研究のためとは言え，利己的な目的のためだけに公共空間に対して無作為に手を入れられるものではない．

---

[5] 3ステップメソッドは，機械類の安全性の設計のための基本概念一般原則が示された，JIS B 9700-1：2004の5章「リスク低減のための方法論」の保護方策／3 ステップメソッドにて示された保護方策の考え方である．3ステップメソッドとは，「(1) 本質的安全設計方策」，「(2) 安全防護策（付加保護方策含む)」，「(3) 使用上の情報」である．これらには，優先順位付けがなされており，本質的安全設計方策で十分にリスクが低減されない場合は，次のステップとして安全防護策を講じ，安全防護策でもリスクが低減されない場合は，使用上の情報でリスクを公開することとなる．これにより，より確実性の高いリスク低減が可能となる．

[6] 欧州の製品安全基準である機械指令（CEマーク制度）においても，研究用に特別に設計された機械に対しては，機械指令を満たすことは求められていない [129].

以上より，移動ロボットが実験しやすい形を取りながらも，移動ロボットの保護方策と環境の改変のバランスを取り，環境と移動ロボットをセットで考え，実験主催者側と実験参加者側で合意を取りながら，効率的な保護方策を行う必要がある．

2.4. リスクマネジメント体制構築の課題

2.4.1 安全知識の共有不足

一つ目の課題は，リスクマネジメントに対する知識のステークホルダー間での共有不足である．研究開発中の医療機器の臨床試験では，ステークホルダーが限定的（医師，患者，メーカーなど）であり，リスクマネジメントの知識が共有化しやすい．一方，移動ロボットを用いた公共空間での実証実験に必要なリスクマネジメントに対する考え方はあまり浸透しておらず，安全に対する知識の共有不足が課題である．

原因の一つには，リスクコミュニケーションの不足がある．科学技術を含めて，あらゆる事象には利便性と危険性が含まれている．リスクコミュニケーションとは，事象に対して情報を持つ行政や企業，研究者は，事象の持つポジティブな側面だけ出なく，ネガティブな側面についての情報も公正に伝え，関係者が共考しうるコミュニケーションである [75]．移動ロボットなどを含む機械類の製品では，一般的にリスク情報を機械の利用者に受け渡す取扱説明書や，機器に表示された注意書き，機器の導入時のトレーニングや講習などもリスクコミュニケーションの事例になる．

リスクマネジメントの原則及び指針を示した，JIS Q31000:2010の5.2節では，リスクコミュニケーションは「外部及び内部のステークホルダーとのコミュニケーション及び協議は，リスクマネジメントプロセスのすべての段階で実施することが望ましい」と示されている．さらに，「ステークホルダーは，リスクに対する自らの認知に基づいてリスクに関する判断を下すため，ステークホルダーとのコミュニケーション及び協議は重要である」ともある，重要な取り組みの一つである．移動ロボットの実証実験においても，考慮が必要である．

2.4.2 安全の説明体制の課題

二つ目の課題は，実験の安全性の確認をどのように説明するかである．一般的な製品の各関係者は，メーカー・開発者などを第一者，製品の購入者・使用者な

どを第二者，認証機関や適合性評価機関などを第三者と区別することができる．一般的な機械や製品の安全性の評価については，第三者が実施し，製品に合った法律・規格を元にその製品の評価を行うが，規格が存在しない場合には残留リスクの妥当性の判断あるいは認証を行えない場合がある．このため，規格化や認証制度化が未成熟な，研究開発中の移動ロボットの残留リスクの確認をどのように行い，どのように説明するかが課題である．

さらに，第一者と第二者の関係において，実験を実施する第一者は実験を実施しない場合と比べ，第二者にあたる市民や通行人に対して，リスクレベルが客観的に上がらないことを説明する必要がある．これは，研究開発中の移動ロボットでは不特定多数の市民や通行人が，医療機器における被験者の一部となる可能性があるためである．実験に伴うリスクレベルを減らすために各種の保護方策を実施する必要があるが，リスクレベルをゼロにすることは不可能であり残留リスクが発生する．また，設計業務を専門としない研究者が製品並みの保護方策を行うことは限界がある．一方，安易に市民や通行人の残留リスクを増やすわけにはいかない．このため，研究開発者以外による安全の確認と，追加の保護方策を講じることによりリスクの管理を確実に行うリスクマネジメントの考え方が必要となる．

2.5. 公共空間を用いた実証実験のリスクアセスメントとリスクマネジメント手法の提案

提案する移動ロボットの実証実験の安全上の課題を考慮し，実施可能なリスマネジメントの手法をFig. 2-4に示す．Fig. 2-4は，JIS Q31000:2010 を元に作成したものであり，第2.5.1項に示すリスクアセスメント手法（Fig. 2-4Loop (A)）と，第2.5.2項に示す自己適合宣言（Fig. 2-4 (a) Loop (B)）を含むものである．

JIS Q31000:2010では，リスク管理を実施する際の基本的なプロセスの構成要素とその適用に関する指針や，枠組みとプロセスを管理するための組織運営管理体系を提供している．ここでは移動ロボットの公共実証実験の安全上の課題を，JIS Q3100:2010 図1（Fig. 2-5）-リスクマネジメントの原則，枠組み及びプロセスの関係より考慮し整理する．JIS Q31000:2010のプロセスからの変更点は，リスクアセスメント内に機械類の制限の決定（Determination of the Limits of the Machinery）が追加され，リスク対応（Risk Treatment）が保護方策（Protective Measure）となっている．なお，Fig. 2-4に示したカッコ内の数字は，本論文の対応する項を示している．

公共空間で実験を実施するには，体系的なリスクアセスメントをベースとした移動ロボットの保護方策と，移動ロボットの開発者と実験の主催者との間でリスクの受け渡しを管理するリスクマネジメント体制の構築が必要である．本節では安全規格の観点から各プロセスの論理構造を明らかにし，それぞれについて提案を行う．

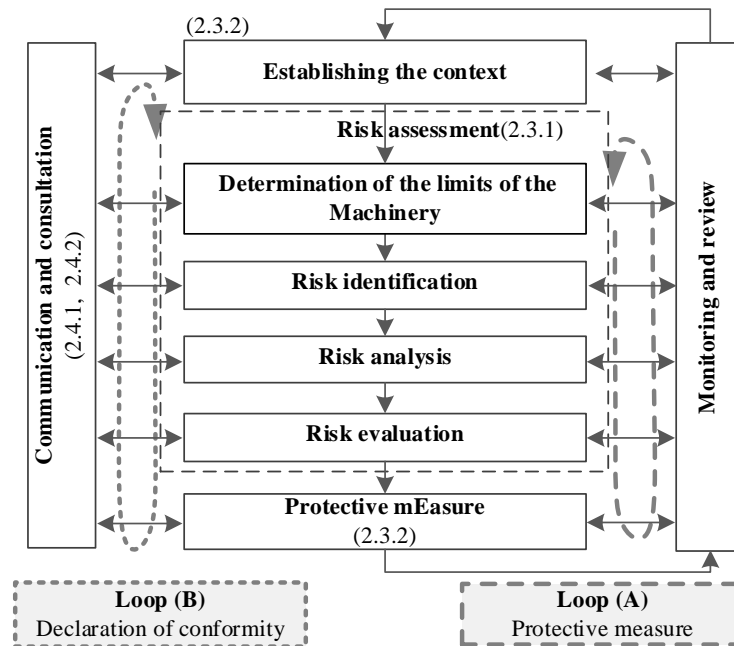



Fig. 2-4：Necessary process for risk management to demonstration experiment with reference to JIS Q31000:2010 [74]

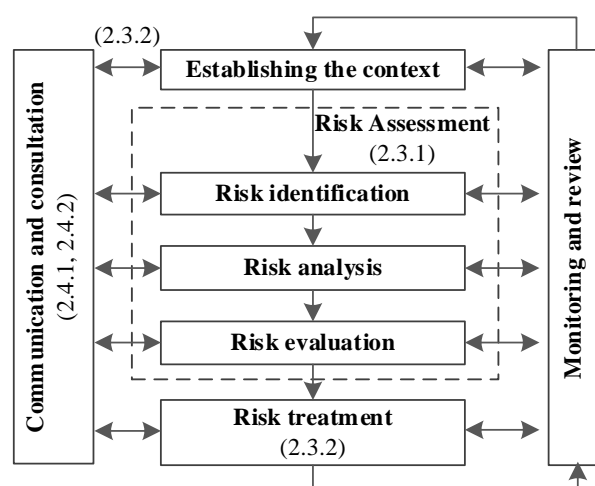



Fig. 2-5：Process for risk management (JIS Q31000:2010, Fig.1) [64]

2.5.1 移動ロボットの保護方策と実験環境の制約のバランスを考慮したリスクアセスメント手法

研究開発中の移動ロボットの保護方策が不完全であることを前提に，移動ロボット側と環境側をセットにしたリスクアセスメントを行い，本来の実証実験の目的を損なわないような，本論文で提案する柔軟な保護方策の流れをFig. 2-7に示す．Fig. 2-7は，JIS B 9702:2000の図1（Fig. 2-6）に示されたリスクアセスメントの反復的プロセス（Fig. 2-7の破線により囲われた部分のリスク低減プロセス）を含むものであり，二つのループを持つ．一つ目のLoop (a)（実験主催側による"仮想ロボット"に対するリスク低減）では，実証実験の主催側があらかじめ，実験に参加する移動ロボットを想定した「仮想ロボット」を対象としてリスクアセスメントを行い，二つ目のLoop (b)（開発者による"実際のロボット"に対するリスク低減）では，実際のロボットを対象としてリスクアセスメントを実施する．

はじめにLoop(a)側の実験の主催者は，あらかじめロボットの研究者・開発者から得た，実験に参加するロボットの大まかな情報などから仮想ロボットを設定し，これに対して適切な保護方策を検討する．この段階で，実際のロボット側のリスクが適切に低減できない場合には，環境側へ追加の保護方策を検討するか，実験に参加する実際の移動ロボットへの要求仕様として，制約をあらかじめ設けることが必要となる．つぎに，Loop(b)側の実際のロボットに対しても同様な保護方策を実施するが，実際のロボット側で保護方策の対応が困難な場合には (Fig. 2-7の(7))，実験の主催者側で改めて保護方策を検討し (Fig. 2-7の(6))，環境に保護方策の追加や，実験に参加する移動ロボット全体への追加の要求仕様や，制約を設けるかの判断を行う．この一連のリスクアセスメントを用いたリスク低減プロセスを反復させることで，許容可能なレベルまでリスクを低減させる必要がある．

これにより，実験の主催者側と移動ロボットの開発者側の保護方策をセットにすることで，仕様の改変を前提とした実証実験においても効率的なリスク低減を行うことができる．さらに，リスク低減プロセスを共有することで，実験に携わる各者の安全知識の共有不足を補うことが期待できる．また，移動ロボットの開発者に不要な負担を減らすことが可能となり，応急的な保護方策の削減が期待できる．なお，この手順を実施することでどのような保護方策を実施したかが明らかになり，保護方策が適切であったかの体系的な確認と検証も可能となる．

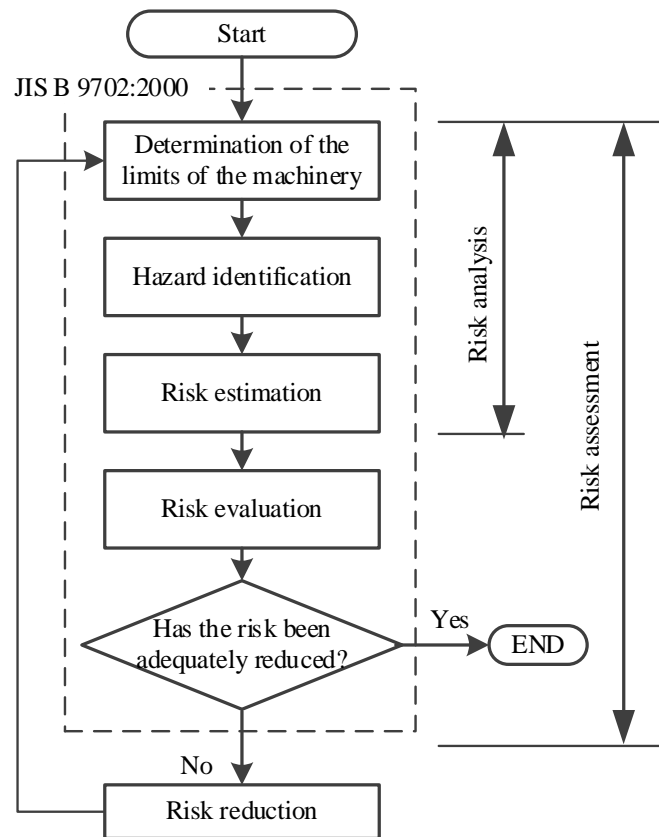



Fig. 2-6 : Process for risk management (JIS B9702:2000, Fig.1) [66]

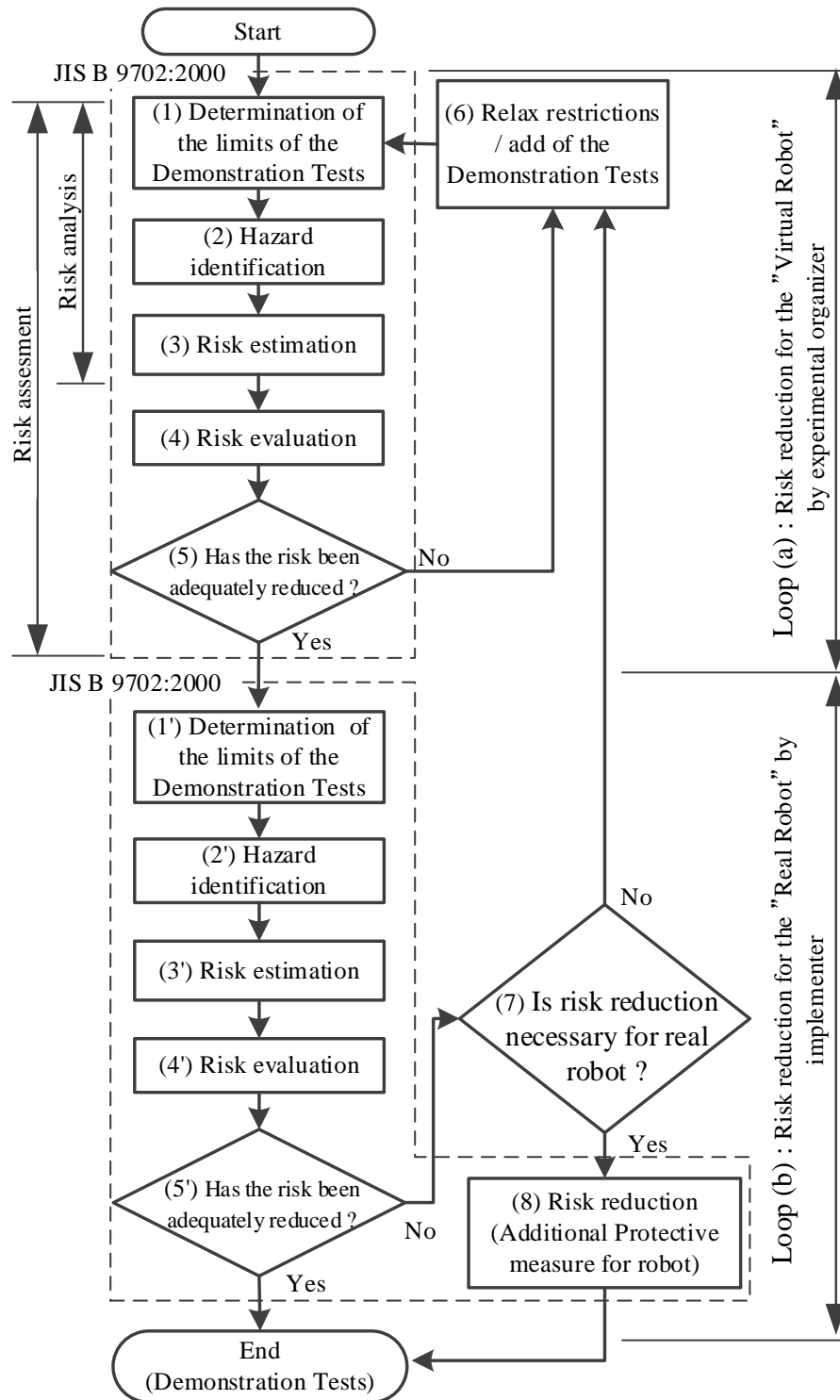



Fig. 2-7 : The risk assessment demonstration procedure with the proposed public space

2.5.2 自己適合宣言を中心としたリスクマネジメント体制

実証実験に必要なリスクマネジメント体制をFig. 2-8に示す．Fig. 2-8 は，一般製品における「自己適合宣言」[76]（第一者証明）の枠組み及びプロセスの関係を元に，つくばチャレンジのような屋外の公共空間を用いた実証実験に必要な体制と，関係者の位置づけを示したものである．ここでは実証実験を実施する実験主催者や移動ロボットの開発者・研究者を「第一者」，実験対象の一部となる市民や通行人を「第二者」，行政（警察・自治体など）や保険制度を「第三者」としている．

研究開発中の移動ロボットにおいても，製品並みに安全であるかを第三者による認証を取得した後に実証実験を行うことが理想的であるが，仕様の改変が多い研究開発段階では困難である．また，基準が不明確な模索的な段階では，第三者の認証機関や適合性評価機関などによる認証制度での運用は難しい．このため，公共空間を用いた実証実験では，JIS Q17050-1:2005 [77]に相当するような，第一者による内部監査や内部証明を行う，「自己適合宣言」を行うことが現段階では適当であると考える．つくばチャレンジの例では，実験の主催者側による移動ロボットへの「車検」などの保護方策がこれに該当する．

なお，JIS Q17050-1:2005 では，適合宣言の目的を「識別された対象が宣言書中の規定要求事項に適合しているという証明を与えることであり，適合及び宣言の責任者を明確にすることである」としている．規格要求事項には，妥当性の検証を行う際にどの規格を用いたかを技術仕様書や引用法律，規則など，定められた様式の文書として残すことも含まれており，実験の主催者などはこれに該当するような文書を作成し，文書によりいつでもロボットが適切な保護方策が実施されていることを説明できる状況にする必要がある．また，同時に実験に参加するロボットの開発者側も，文書により説明できる状況にする必要がある．

説明の必要性についてJIS B9700-1:2004では，残留リスクはユーザーに対して十分に告知し，警告することを求めており，一般製品ではマニュアルなどでの説明や講習制度などで，使用者に対してリスクの受け渡しを実施している．さらに，医療の分野では，実験実施者側から臨床試験などで参加する被験者側に対しては必ず説明（インフォームドコンセント）が義務付けられている．このようなことから，実験の対象の一部となる市民や通行人に対して，何らかの説明ができる状態にする必要がある．

実験のための手順の考え方は以下の通りである．第一者である実験主催者は，実験のための各者との関係の確認と，組織の状況を確定させる（Fig. 2-8(B)(1)）．実験に関するルールを検討し（Fig. 2-8(B)(2)），第三者の行政（警察など）に説明を行うことで実験実施の許可を得る．実験に参加する移動ロボットの開発者

は，第三者から得た許可の条件を元に，移動ロボットのリスクアセスメントと共に開発を実施する（Fig. 2-8(B)(3)）．さらに，開発した移動ロボットが実験に関するルールに基づいていること，適切な保護方策の実施と安全の妥当性を確認したことを文書に残す（Fig. 2-8(B)(4)，Fig. 2-8(B)(5)）．この後，実験主催者側は，移動ロボット開発者が作成した文書とともに，移動ロボットの実機を照らし合わせ，妥当性を確認することで実験の実施となる（Fig. 2-8(B)(6)，Fig. 2-8(B)(7)）．なお，移動ロボットの開発者が作成した安全の妥当性を確認した書類は，実験の対象となる市民などに公開を求められた場合には，必要に応じて公開できる状態にすることが望ましい．また，第一者もしくは第三者の行政や，第一者の実験主催者は事前に，第二者となる市民や通行人に対して，実験の説明を行う必要がある．

さらに，市民や通行人が通常の屋外で移動する場合には，自動車や自転車などから受けるリスクは比較的高い．このようなことから，移動ロボットの屋外実験でもこれらのリスクと比較し，客観的にリスクが上がらないことの対策と説明の必要がある．また，仮に事故が起きた場合のセーフティーネットとして，第一者による保険制度への加入が必要となる．

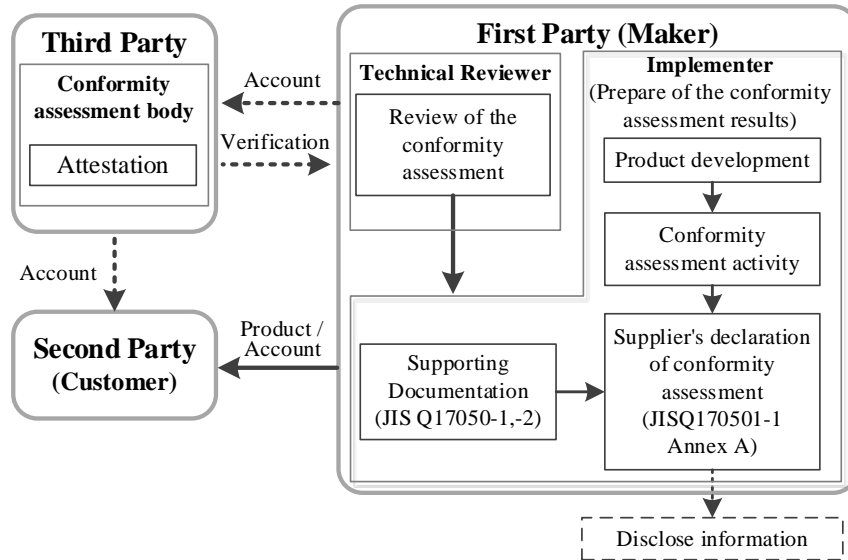
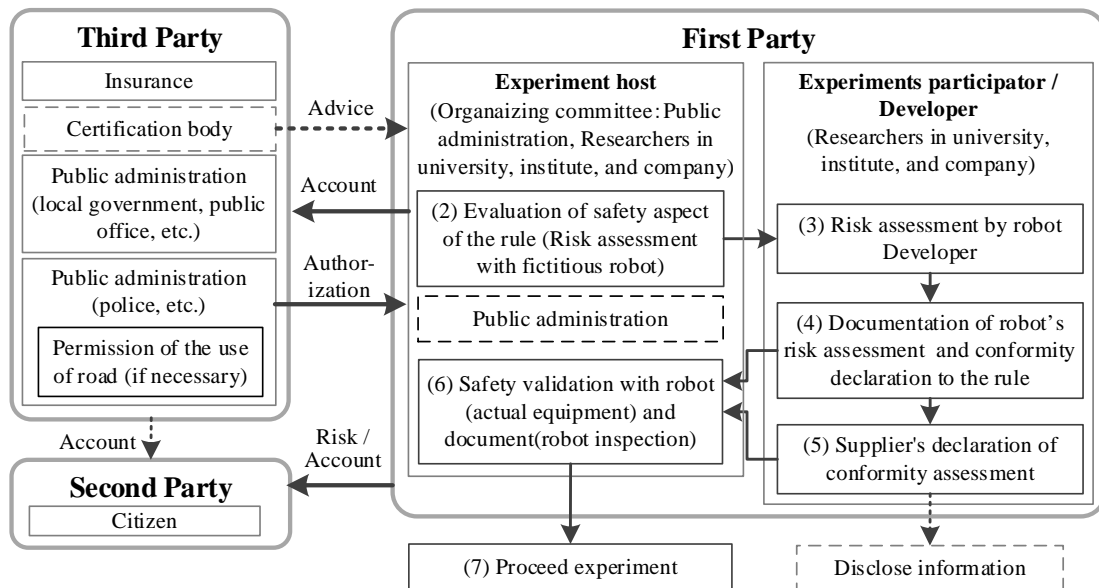
なお，実証実験では第一者である実験実施者側から，第二者にあたる市民へはリスクのみが渡され，短期的には直接的なベネフィットが見出しにくい．しかし，将来的には市街地を自律走行するサービスロボットなどにより，直接的なベネフィットを受ける可能性がある．これらを市民に十分説明する必要があり，この対策は今後の課題である．

(A) General products

(B) Tsukuba challenge

Fig. 2-8 : The framework and the process of the supplier's conformity assessment for (A) general products in JIS Q17050-1:2005 and (B) Tsukuba Challenge with reference to JIS Q17050-1:2005

2.6. 提案手法の保護方策の有効性の検証

第2.5節で提案した，実験環境の制約と移動ロボットの保護方策のバランスを考慮したリスクアセスメント手法と，第一者による自己適合宣言を中心としたリスクマネジメント体制について，つくばチャレンジの事例より有効性を検証する．

2.6.1 つくばチャレンジにおける仮想ロボットによるリスクアセスメント事例

環境を改変することを前提とし，実験環境の制約と移動ロボットの保護方策のバランスを考慮した，Fig. 2-7に示した2つのループを持つ段階的なリスクアセスメントの特徴的な事例の抜粋を，Fig. 2-12に示す．Fig. 2-12に示すリスクアセスメントシートは，実験主催者側が用いることを想定して作成されている．

一般的なリスクアセスメントでは一つの危険事象に対して，まず実験環境の制約を確定させ，機械に対する保護方策の結果，残留リスクが許容可能なレベルまで実施するが，本論分では一つの危険事象に対して，環境側とロボット側の双方で追加のリスク低減方策を実施し，許容可能なレベルまで実施している．これにより，実証実験というロボットの仕様が不確定な状態において，仕様変更に伴うリスクアセスメントの詳細な再実施を簡略化でき，ロボットは環境側の保護方策の有効な範囲で仕様の変更が可能となる．この環境側のロボット（Fig. 2-7 Loop(a)）を「仮想ロボット」とした．

「仮想ロボット」にてリスク低減を実施する目的は，移動ロボットの研究開発に携わる，ロボット開発者である第一者，実験対象者となりえる第二者，実証実験の主催者や実験に携わる自治体，警察などの規制行政となる第三者などのステークホルダー間での共通認識を形成することである．さらに，実証実験に参加する移動ロボットに対する安全方策の具体的な方策を定めることである．

実証実験の初期の場合には，どのようなロボットが実験に参加するか不明瞭な場合がある．このため，安全管理を実施する実証実験の主催と警察などの行政および，ロボット開発者などとルールを決める際の対話の際に仮想ロボットを仮定（定義）しているはずである．つくばチャレンジの事例でも「仮想ロボット」はある程度は定義されていた．この結果を踏まえて，第2.2.3項に示したようなルールが策定されたが，ここに至る過程は文章等で明確に記録はされていない．ここでの発展性や研究の自由度は，具体的な定義は困難であり，各研究者の漠然としたイメージ（主観）になり，暗黙知的な議論により確定された．このような

議論の過程であったために，ロボットの危険性など，どこまでの事故を「想定内」にしたかや，検討結果に妥当性があったのかを第二者・第三者らに対し証明ができない問題があった．このために，仮想ロボットによるリスク低減手法が有効であると考える．

つくばチャレンジの事例では，実証実験の実際の事象と危険源リストを比較し，危険源の洗い出しを実施した．リスクの判断指標には「加算法」[78]を用いて，リスクレベルRの式(1)に示す．それぞれの指標の内容と相当する値（点数）は以下のように定義した．危害の程度S は，危害のひどさ（潜在する危害の程度）から「致命傷 10，重症 6，軽傷 3，軽微な傷害 1」で示し，危害の発生確率Pは，発生確率の高さから「確実に発生する 6，可能性が高い 4，可能性がある 2，ほとんどない 1」とし，危険源にさらされる頻度（暴露頻度）Fは「頻繁 4，時々 3，たまにある 2，ほとんど無い 1」とした．値が高いほど，許容できないリスクレベルが高いとなる．それぞれを加算した値のリスクレベルRは，点数20～13をリスクレベルⅣ，点数12～9をリスクレベルⅢ，点数8～6をリスクレベルⅡ，点数5以下をリスクレベルⅠとした．リスクレベルⅢ以上は，許容できないリスクとして，追加の保護法策をとるなど，何らかの対応が必要とした．

$$R = S + P + F \qquad (1)$$

リスクの評価指標には加算法のほかに，リスク評価要素毎の評価点を加算する「積算法」や，危害のひどさと，危害の発生確率にかかわる副要素を，たて横の2軸の評価軸の組合せで評価する「マトリックス法」，リスク評価要素毎に評価の分岐経路を定め，最終的にリスクレベルを導く「リスクグラフ法」がある．

それぞれの特徴として次が挙げられる [78]．加算法は日本の製造業で多く用いられている手法であり，リスク評価要素の増減が容易だがリスクの低減効果が見えにくい．一方，積算法は加算法に比べ，リスク低減効果は反映しやすい．さらに，マトリックス法は，リスクの低減方策実施前後の比較が容易であるが，適用できるリスク要素に限界がある．リスクグラフ法は，リスクの比較と妥当性の確認は容易だが，リスク評価要素の評価分類を多くすることは困難などの特徴がある．今回は，日本で多く用いられている加算法を採用し，リスクアセスメントを実施した．

環境の改変は実証実験への参加者にとっても，リスクアセスメントを実施するうえでも，前提条件が変わることは極力避ける必要があるために，実験主催者内で協議・合意し，環境を確定させる必要がある．このためFig. 2-7に示したLoop(a)を実施し，その後の環境の変更がないように備える必要がある．提案するリスクアセスメントシートは，Fig. 2-7の手順を元に「③環境側への追加の保

護方策」「④仮想ロボットへの追加の保護方策（実ロボットに必要な保護方策）」「⑤環境側への追加の保護方策（追加）」と3段階の保護方策になっている．具体的な危険源の同定には，JIS B 9702:2000の付属書Aで示される危険源リストを用いた．リスクアセスメントの結果（Fig. 2-12）の特徴的な具体的な事例（抜粋）を次に示す．

(a) Fig. 2-12のNo.1

「①危険事情：重量が95kgのロボットが転等することにより，子供が頭部損傷で死亡」では，危害に至る原因はJIS B 9702:2000付属書A No.1の「機械的危険源 c)質量及び安定性」より，危害に至る原因を「本体の安定性（バランス）の悪さ」とした．ここでは，リスクレベルはIVとなり，許容できないために，まずFig. 2-12の③環境側で各対応することで，リスクレベルをIIIまで下げられるが，まだ許容できないレベルのため，仮想ロボットに対して，追加の保護法策を検討した（Fig. 2-12の④仮想ロボットへの追加の保護法策）．ここでは，一つ目に，ロボットの予定重量を95kgから80kgに軽量化し，二つ目に，ロボットの凸部にクッション材を設置するなどし，衝突の衝撃を低下させ，最後に，ロボットに警告用の点滅ランプを設置し，市民に対して警告を促す取り組みを行うことで，許容可能なリスクレベルIIまで低減可能とした．

(b) Fig. 2-12のNo.2

「①危険事情：本体重量95kgのロボットが時速4km/hで子供に衝突し，子供が転送し骨折」ではNo.1と同様なリスク低減方策により，許容可能とした．

(c) Fig. 2-12のNo.3

「①危険事情：自転車に搭乗した子供が下り坂で加速し，ロボットに衝突し骨折」では，危害に至る原因はJIS B9702:2000 付属書A No.1の「機械的危険源 d) 質量及び速度（制御又は無制御運動時の構成要素）」とし，No.1と同様なリスク低減方策としたが，④仮想ロボットへの追加の保護法策でも，許容可能なレベルに達しないことから，⑤環境側への追加の保護法策として，「コース上に注意（ロボットが実験中であること）を促す看板設定（自転車が坂道を下る際には，市民に対して自転車から降りてもらうように依頼）」とし，許容可能なレベルとした．

なお，この際にFig. 2-9に示すような動画を作成し，実証実験に関わるステークホルダー間でのリスクコミュニケーションを実施することで，リスク

低減の必要性などを共有した．Fig. 2-10にリスクアセスメントの実施前後の一つの事例を示す．主にカバーなどの保護具の追加が中心であったが，実ロボットにおける許容可能なレベルまで低減された一つの事例である．この事例では，保護方策は，JIS B9700-1:2004に示された，3ステップメソッドのうち，2つ目の優先順位の「安全防護策」が中心の事例である．主に，危険源に対して，カバーや，緩衝材などの保護具を追加するなどの対策である．Fig. 2-10の左の保護方策前の状態で，Fig. 2-9のような，危険事象が発生した場合には，鋭利な構造材などが多くリスクレベルが高い．しかし，Fig. 2-10（右）の保護方策後の状態では，鋭利な構造材に対して保護具が追加されることで，リスクレベルを軽減した事例の一つである．

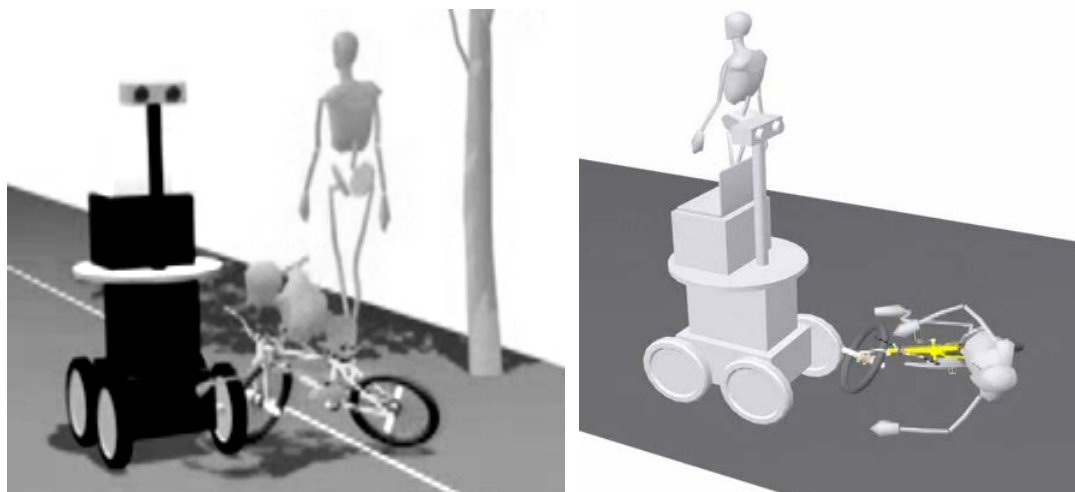



Fig. 2-9：Snapshots of a video for explanation of risk communication

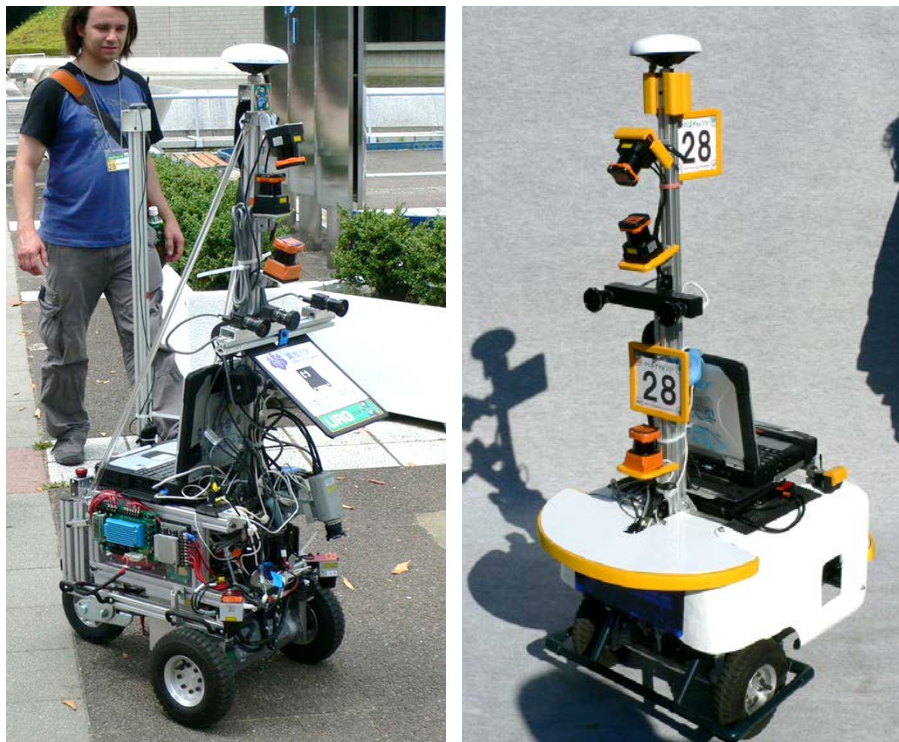



Fig. 2-10：An example of risk assessment example
(Left) Before execution of risk assessment
(Right) After execution of risk assessment

(d) Fig. 2-12のNo.4

「①危険事情：走行途中の幹線道路の上を横断する橋の欄干にロボットが衝突し，ロボットの部品が幹線道路を走行中の自動車のフロントガラスに当たり，自動車が人身事故を起こし，複数の通行人が死亡」では，危害に至る原因はJIS B9702:2000 付属書A No.20.4の「移動性によって付加される危険源，危険状態及び危険事象」内の「減速，停止及び固定するための機械能力が不十分」より，危害に至る原因を「部品の不十分な強度で起こるもの」とした．本来であれば，本質的に移動ロボットが橋の欄干に衝突しても部品が落下しない構造に設計し，対処できているかを確認することで完了する（仮想ロボットへの追加の保護方策，Fig. 2-11）．しかし，研究者や学生が開発・製作したロボットでは「危害の程度」「危害の発生確率」（リスクの程度）が共に高くなる可能性があり，製品並みの完成度や保護方策の実施は期待できず [69]，仮想ロボットへの追加の保護方策でも「危害の程度」の低下が不確かなため，橋の欄干にネットを設置し，本質的に部品が落下しない保護方策を取るとした（Fig. 2-11（右写真））．仮に，実際のロボットに対してすべて

の部品が落下しないことを確認することも可能であるが，安全確認の手間が膨大になる可能性がある．しかし，欄干にネットを張ることで実験直前の安全確認の軽減が可能となる．第2.2.2項の（5）に示された保護方策は，上記のような検討の結果追加された保護方策の一つである．

この他にFig. 2-12のNo.4のように，ロボットに対する保護方策だけでは限界があったため，JIS B9700-1:2004に示されたリスク低減プロセスの，使用者側で講じる保護方策を取る必要があった．具体的には，実験の日時や場所の制限，道路に実験中であることの注意を促す看板の設置や，走行するロボットには必ず開発者が伴走しロボットを停止できるようにし，各実験参加者には「安全管理者」を設けるなどの追加の保護対策などが取られた．

Fig. 2-11: Risk assessment shown in result were based on Fig.2-5

2.6.2 つくばチャレンジにおけるリスクマネジメント

つくばチャレンジでもFig. 2-8に示したような，自己適合によるリスクマネジメント体制が構築された．実験を実施する研究者・開発者（第一者）の移動ロボットに対して，実験を主催する実行委員会（第一者）に属する安全委員会が移動ロボットに「安全確認」（内部監査，つくばチャレンジでは「車検」がこれに相当）を実施する．車検では，市民や通行人（第二者）が行き交う公共空間を対象に，移動ロボットの保護方策が適切かの安全確認を実施していた [79]．また，実験主催者とつくば市は，第三者となる警察（行政）に対して実験の説明を行い，道路使用許可を取得し警察の指導の元で実験を実施した．さらに，つくばチャレンジではつくば市（行政）は，第一者側となり実験主催者側と共に，道路に実験

中であることの注意を促す看板の設置などを行い，市民や通行人に対して告知などが実施された．このように，体制については確認できたが，プロセスについては次のような課題が確認できた．

一つ目に，自己適合によるリスクマネジメント手法を，つくばチャレンジに対して再検討した結果，移動ロボットの安全確認を行うことで「内部監査」に相当するところまでは実行できていたが，文書による記録の「内部証明」のプロセスは不十分である可能性があることがわかった．また，実証実験前に実験主催者側により各ロボットの安全性の確認（車検）を実施する際に，危険源を確認するためのチェックシートは存在するが，移動ロボットに類似するような規格類や，JIS B9002:2004の付属書Aに示された「危険原，危険状態及び危険事象リスト」と比べると内容が乏しい状態であった．さらに，JIS Q17050-1:2005に示された技術仕様書や，引用規格（ルール）や法律などの各種文書類は，実験を実施する移動ロボットの保護方策の妥当性を確認ができるレベルではなかった．ただし，一般製品並みにすべてを確認することは煩雑となる．このため，実証実験に参加する移動ロボットのチェックリストなどの内容については，機械安全などを専門とする第三者認証機関や機械安全の研究者などと積極的な協議が必要と考えられる．

二つ目に，各種文書類は，第一者にあたる行政や，第二者である市民が情報の開示を求めた際に公開可能な状態にしておく必要がある．情報開示をすることで責任の所在が明らかになり，さらに実験を実施していない場合と比べ，市民や通行人のリスクレベルが客観的に上がらないことを市民に説明する際の手段となる．しかし，つくばチャレンジでは市民側が実験によりリスクレベルが客観的に上がっていないことの説明を受ける機会は少なく，その体制と手順について情報開示など追加の整備をする必要があることがわかった．

なお，公共空間を用いた実験の必要性について，第二者の市民と第一者の実験実施者側との対話や合意形成の事例として，2011年よりつくば市において総務省より認定された「モビリティロボット実験特区」が挙げられる [73]．ここでは，米セグウェイ社のSewgay PT [80]やトヨタ自動車社のWinglet [81]などの製品，もしくは完成度が高く製品に近いモビリティロボット（ロボット技術を活用し人が搭乗して移動するための機器）の社会的な有効性や歩行者等との親和性，社会受容性等についての検証実験（社会実験）が実施されており，市民からは比較的肯定的な意見が挙がっている．

2.7. まとめ

本章では，サービスロボットのうち公共空間を用いた移動ロボットに焦点を当て，国内において研究開発中の移動ロボットが，公共空間で実証実験を行う際の課題を整理し明らかにした．研究開発途中の移動ロボットの実証実験において，製品開発と同等な安全管理では煩雑になり，研究開発に支障をきたす．また，安全管理が実施される場合においても，暗黙知的に実施されることが多い．このため，公共空間などの実環境での実証実験について，広く認知され産業界では強制力がある国際標準規格に基づくリスクマネジメントの視点から，屋外の公共空間における移動ロボットの実証実験での安全上の課題を整理・明確化し，煩雑な安全管理を，安全規格の枠組みを元に整理し，研究者でも実施しやすい安全管理方策（リスクマネジメントとリスクマネジメント）と，第一者による自己適合宣言を元とした，リスクマネジメント体制を提案した．

具体的には，リスクマネジメントの枠組みを示したJIS Q31000:2010の図1（抜粋）を用いて，移動ロボットの実証実験に必要な枠組みをFig. 2-4で提案した．ここでは，リスクアセスメントに機械類のリスクアセスメントの枠組みを示したJIS B9702:2000と同様に「機械類の制限の決定」を加えたことにある．

JIS Q31000:2010は，機械に限定したリスクマネジメントではなく，汎用的に用いられる枠組みであるために，JIS B9702:2000と同様に「機械類の制限の決定」を加えた．さらに，この枠組みを元にした方策が次の二つになる．

一つ目に，移動ロボットの具体的なリスク低減方策の考え方を，機械類のリスクアセスメントの反復的プロセス JIS B9702:2000の図1（Fig. 2-6）を元に提案した（Fig. 2-7）．ここでの大きな特徴は，リスクアセスメントを「仮想のロボット」と「実機のロボット」に分けたことにある．これにより，一般の製品と違い，研究途中の移動ロボットの改変が容易になり，柔軟なリスクアセスメントが実施可能となる．

二つ目，意図せず実験に参加する市民（第二者）や，行政（第三者）に対する説明体制をFig. 2-8で提案した．ここでは，規格がない移動ロボットの実験は自己適合により，評価が適切であるという点と，自己適合に関する枠組みを示したJIS Q17050:2005を元に，具体的な責任を説明できる体制図と，リスクアセスメントの結果を示した文章管理の流れについて示した．

提案した方策を元に，移動ロボットの実証実験の一つである「つくばチャレンジ」を事例に有効性を評価し，提案法の仮想ロボットによるリスクアセスメントと自己適合によるリスクマネジメント体制について分析し，矛盾がないことを確認した．

本章の結果により，実証実験のリスクマネジメントの暗黙知の形式知化が促

進され，同様の実証実験を新規で実施する際に，漏れのない安全管理と効率的な実施が期待できる．また，移動ロボットをはじめとしたサービスロボットの実用化が加速されることが期待でき，研究段階から的確な管理をすることにより，事業化へ容易な移行ができると考える．さらに，安全に関しては，JISなどの規格の枠組みでの説明が求められており[7]，今後の一層の説明責任が求められることが予想される．

つくばチャレンジでは各種「安全確保の努力」の結果，幸いにして大きな事故も起きてないことは一つの成果と考えられる．今後，他の地区で同様な実証実験を実施する際には，つくばチャレンジの成果を元にすることで，行政などとの調整が容易になり，煩雑な作業が軽減されることが期待できる．なお，本論文はあくまでも一つの事例分析であり，他の事例分析を蓄積することで普遍的な実証実験のリスクマネジメント手法の構築が望まれる．

なお，実証実験に合わせた使いやすい危険源リストの作成や，実証実験用のリスクアセスメントシートの作成，移動ロボットや公共空間を用いた実証実験に対応したリスク評価法 [82]の検討については今後の課題である．さらに，自律移動ロボットのような高度な科学技術に対するリスクコミュニケーション [83]手法の検討などは，ロボット分野の研究者の間で議論が深まっていくことを期待する．

---

[7] 日本では，JISなどの技術規格は任意規格のため，欧米のCE規格のように強制力は無い．しかし，2007年に発生した，大阪府吹田市でのジェットコースター脱輪事故において，JISに示された点検事項の未対応に対する責任が問われ有罪となった．この裁判により，一定の条件下においてJISに対応することが求められた [130].

No	作業名	① 危険事象 Fig. 2 7 (2)	危害に至る原因	② リスクの程度 Fig. 2 7 (3)(4)(5)					③ 環境側への追加の保護方策 Fig. 2 7 (6)						④ 仮想ロボットへの追加の保護方策 (実ロボットに必要な保護方策) Fig. 2 7 (3')(4')(5')						⑤ 環境側への追加の保護方策(追加) Fig. 2 7 (7)(6)						⑥ 妥当性確認
				危害の程度 (S)	危害の発生確率 (P)	頻度 (F)	S+P+F	リスクレベル (R)	追加の保護方策 (環境側)	リスク低減したパラメータ					追加の保護方策 (仮想/実ロボット側)	リスク低減したパラメータ					追加の保護方策 (環境側)	リスク低減したパラメータ					リスクレベル (R)
										S	P	F	S+P+F	R		S	P	F	S+P+F	R		S	P	F	S+P+F	R	
1	自律走行	本体重量95kgのロボットが転倒することにより、子供の頭部が損傷し死亡	機械的危険源 (質量及び安定性)	10	4	1	15	IV		6	4	1	11	III	1. ロボット軽量化(95kg→80kg)	4	2	1	7	II							III → II
2	自律走行	本体重量95kgのロボットが時速4km/hで子供に衝突し、子供が転送し骨折	機械的危険源 (質量及び安定性)	6	6	1	13	IV	1.安全管理者の随行しを義務化し、危険事象の際には即時停止できるようにする	6	4	1	11	III	2. ロボットの凸部分にクッション材を設置し、衝突時の衝撃を低下させる	4	4	1	9	II							IV → II
3	自律走行	ロボットに自転車に搭乗した子供が下り坂で加速してそのまま衝突し骨折	機械的危険源 (質量及び速度)	6	6	3	15	IV	2.安全管理者は蛍光ベストを着用し、市民に対して実験中であることを示す	6	4	2	12	III	3. ロボットに警告表示用に発光体(点滅ランプ)を設置し、市民に対して警告を促す	6	2	2	10	III	コース上に注意(ロボットが実験中であること)を促す看板設定 (自転車が坂道を下る際には、市民に対して自転車から降りてもらうように依頼)	4	2	1	7	II	IV → II
4	自立走行	走行途中の幹線道路の上を横断する橋の欄干にロボットが衝突し、ロボットの部品が幹線道路を走行中の自動車のフロントガラスに当たり、自動車が人身事故を起こし、複数の通行人が死亡	部品の不十分な強度で起こるもの	10	6	2	18	IV	3.合計3人の実験参加者が伴走し、ロボットの移動即時停止や、移動ロボットと市民との間接的な隔離等を実施し、市民を保護	10	6	2	18	IV	ロボットが橋の欄干に衝突しても部品落下がないかを確認	10	2	1	13	IV	橋の欄干にネットを設置し、万が一ロボットが衝突し部品欠落しても橋の下に落下しにくい対策を実施	1	2	1	4	I	IV → I

Fig. 2-12: An example of risk assessment result

第3章

研究開発用の災害対応ロボットプラットフォーム「MATOI」の構築

2011年3月11日に発生した東日本大震災によって大きな被害が生じた．東日本大震災では，地震自体による被害だけでなく，地震によって引き起こされた大津波，さらには福島第一原子力発電所事故など複数の要因が重なり合って大きな被害をもたらした．特に原発での事故に着目すると，これらの災害へ対応するためにいくつかのロボット技術が投入されている．例えば，福島第一原子力発電所事故建屋内の調査のためQuince（千葉工業大学，東北大学，国際レスキューシステム研究機構） [84], PackBot（iRobot社） [29], Talon（Qinetiq社） [30]などが導入された．また，福島第一原子力発電所事故敷地内では，無人化施工機械[33]などが活躍している．このように，ロボット技術が災害対応に貢献している事例はあるものの，“現場”で活躍できるロボット技術というものは非常に限られているのが現状である．

日本においては，1995年の阪神淡路大震災や1999年の東海村JOC臨界事故を契機に，災害対応ロボットが数多く開発されてきた（ [26] [27]）．しかし，その多くは研究開発段階であり，その後実用化されたものは少ない．このため，東日本大震災に適用できた事例も限られていた．また，災害対応ロボットは，未知の環境で使用されることが多い．このため，環境に合わせて，迅速な開発が必要であるが，模索的な開発となってしまい，開発費や人員，開発時間などの限られたリソースで行うには限界がある．

本章では，第 1.3 節に示した災害対応ロボットの研究フェーズから実用化への隔たりの問題について，次のような提案をする．開発時間などを短縮するために，市販品や他で開発されたソフトウェアモジュールを再利用して，共通プラットフォームとなりえる，研究開発用の災害対応ロボットプラットフォームを構築し，実証実験から実用性を検証する．さらに，他の研究開発ロボットと比較し，開発効率における優位性を検証する．

3.1. プラットフォームロボットとモジュール化による開発

先端の研究開発を行っている大学や研究機関などが，実用化を目指した研究開発をすることで，現場で本当に必要とされ，活躍できるロボット技術が普及すると考えられる．さらに，実用に近いものをベースに開発されたプラットフォームを使用することで，実用化を目指した研究開発が効率よく進められると期待されている．市販のセンサなどを搭載した移動ロボットプラットフォームがあれば，研究者や技術者がゼロからハードウェアやソフトウェア開発を行うことなく，より上位の研究に時間を割くことができ，スムーズで効率的な実用化研究開発に繋がる．しかし，実際にはプラットフォームの開発には以下に示す条件が要求されるため，実用化を目指したプラットフォームを開発することは難しいのが現状である [85].

(1) 標準性：移動ロボットプラットフォームは，様々な用途への応用を考慮し，既に確立した装置や技術によって標準化されているべきである．
(2) 汎用性：実用化を目指したロボットプラットフォームは，様々な目的に使用できるような設計になっている必要がある．つまり，様々な環境下において，困難な作業でも遂行できる十分な機能を持つことが要求される．例えば，環境モニタリングロボットには，正確なセンサと安定した移動機構が不可欠である．
(3) モジュラリティと拡張性：不必要な機能を取り除いたり，必要な機能を追加・拡張できるように，移動ロボットプラットフォームに搭載されているセンサ・機器のモジュール類は全て容易に着脱可能である必要がある．
(4) 使いやすさ：移動ロボットプラットフォームは，移動機構や外界および内界センシングなどの多くの機能が内蔵されているべきである．それらは，専門家だけに使えるものではなく，全ての研究者や技術者が容易に扱えるようなものでなければならない．
(5) 安全性：移動ロボットプラットフォームは，暴走する危険や衝突したときにものを破損したり，人に危害を加える危険がある．そのため，安全性を考慮した設計になっていなければならない．
(6) 経済性：移動ロボットプラットフォームが広く普及するには，初期導入コストが安いことも重要な要素である．例えば，研究者や技術者が特別な装置や機械を必要とするのではなく，ノートパソコン一つで始められるような設計になっていることが望ましい．

上述した条件全てを満たしたプラットフォームを開発することは，依然として研究者や技術者にとって大きな課題である．そのため，それらの条件に折り合いをつけながらニーズを満たし，現実的な移動ロボットプラットフォームを開発することが問題となっている．

このための手法の一つとして，モジュール化に着目する．モジュール化の考え方は，1990年代より産業界では普及しており [11]，そのアプローチを災害対応ロボット開発に適用する．ロボットを成り立たせている様々な構成要素を分割管理開発することで，各構成要素の改良と変更が容易になるだけでなく，他者のモジュールの再利用も可能となり，研究開発を加速させることが期待できる．

本研究では，標準化と汎用性を考慮し，モジュール化の考え方を適用し，再利用性を考慮し実用化を目標とした災害対応ロボットの開発を目指す．また，原発事故などの災害においては，状況把握と対応策を検討するために，環境モニタリングや情報収集機能を搭載したシステムをいかに迅速に適用できるかが重要となる．開発するプラットフォームでは，災害時でも情報取集を可能とする環境モニタリングシステムに着目した開発を実施する．

3.2. 既存の移動ロボットプラットフォームの課題

前節で述べた移動ロボットプラットフォームに要求される条件のなかで，これまでに多くのプラットフォームが研究開発されてきた [29] [30] [86] [87] [88]. Table 3-1は，各ロボットの用途および機能をまとめたものである．

大学などの学術分野では，移動ロボットプラットフォームは研究教育用途で使用されている．例えば，Pioneerシリーズ（Adept MobileRobots社） [86]は研究用ロボットとして一般に普及している．それらは，移動ロボットの遠隔操作，自己位置推定，地図作成といった研究開発に適している．日本国内で見れば，Beego（筑波大学知能ロボット研究室，移動ロボット研究所） [87]が同様に広く使われている．PioneerやBeego，BlackShip [89]は，研究開発用として優れたロボットプラットフォームだが，本研究で目的とする実用化に向けた災害対応ロボットの開発とは開発思想が異なっている．PioneerやBeego，BlackShipは，屋内の研究室などで，基礎技術の研究に用いられることを意識した設計思想になっている．しかし，これでは荒地や段差などを走行する性能が低い場合や，屋外での利用を想定してないために，防塵・防水性能が備わっていない場合が多い．これらを満たすためには，大幅な改良が必要であり，最初から考慮した設計がされた，ロボットプラットフォームが必要となる．

一方で，企業などの産業分野においては，より実践的なプラットフォームの研

究・開発が進められてきた．例えば，主に警備・警察・軍事用途として普及しているPackBot [29]やTalon [30]は，探索救助・偵察監視・爆弾処理等の様々なタスクにも用いられている．しかし，研究開発における限られた予算内で入手するには高価であることや，ロボットをパソコンなどから制御するインターフェースが公開されない場合などの問題がある．

ソフトウェアの観点から言えば，上半身のみのヒト型の研究用ロボットPR2（WillowGarage社）[88]は，ロボット用ソフトウェア開発のためのミドルウェアであるROS（Robot Operation System）を利用している点が特徴的である．しかし，その適用環境は主に人間の生活環境に限定されており，NBC災害などにおける探索救助または偵察監視といった災害対応プラットフォームとして使用することは難しい．

Table 3-1: Comparison of uses and features of existing mobile robot platforms.

Robot	Pionner	Beego	PackBot	Talon	BlackShip
Purpose	R&D	R&D	Multiple rasks	Multiple rasks	R&D
Payload [kg]	23	1	25	150	40
Weight [kg]	9	3	35	52	20
Size (W x L x H) [mm]	440 x 380 x 220	300 x 270 x 280	530 x 700 x 1060	1025 x 680 x 440	460 x 640 x 310
Max Velocity [m/s]	1.6	0.8	1	1.5	1

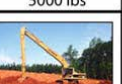
3.3. 移動ロボットプラットフォーム MATOI

本節では，前節までに挙げられたプラットフォーム開発の課題を踏まえ，災害現場等での環境モニタリングを想定した移動ロボットプラットフォーム「MATOI」について述べる．

3.3.1 開発コンセプト

阪神淡路大震災やアメリカ同時多発テロ事件のような災害地であれば，瓦礫の上や中，倒壊の有無を問わず建物の中を探索するQuinceやPackBotなどのような比較的小型のロボットが有効である．一方，MATOIのようなサイズのロボットの用途は，無人による巡回などの作業が中心になる．福島第一原子力発電所事故のような事故後の復旧現場において，作業者の作業支援として，以下に示すような活用を想定している．これにより，作業者の被爆の軽減が期待できる．

(1) 事故などが発生した場合に，遠隔操作により調査活動を実施する
(2) 作業者が搭乗し，自律・半自律的に作業現場まで移動する
(3) 大型の無実化施工機械が入っていけないような小道に，作業者を自律的に追従し，重量物などの荷物のなどの搬送を行う
（“リヤカー”のような用途）

MATOIやQuinceのような陸上を走行する移動ロボットの防衛分野での総称は，「陸上無人機システム」（UGS：Unmanned Ground System），または「陸上無人車両」（UGV：Unmanned Ground Vehicle）であり，重量が数十トンの戦車のような大型車両から，重さ1[kg]未満の小型のものとされている．アメリカ合衆国国防総省が2004年に自律移動ロボットの開発ロードマップなどを示した資料 [90]では，Fig. 3-1に示すような分類がある．

PackBotやQuinceのようなタイプは，Small（Light）サイズに規定されており，主に偵察や探索，爆発物対応や処理などで用いられている．2001年のアメリカ同時多発テロ事件での，崩落したビルでの探索活動では，このクラスのロボットが活躍した [28]．また，MATOIはSmall（Medium）サイズに該当し，荷物の運搬や爆発物の処理などに用いることを想定している．小型のロボットであれば，災害時には狭いところに入り込んだ探索活動が行え，倒壊現場であれば重量が軽いために，ロボットが走行することによる二次倒壊を防ぎやすいなどの利点がある．一方で，小型のロボットでは発電所施設などの広大な範囲を巡回する用途には，走行速度やバッテリの容量などにより，走行距離が短く，広範囲な巡回には向かず，MATOIのようなSmall（Medium）のサイズ以上のロボットが必要になる．

MATOIの開発コンセプトは主に2つある．1つ目は，研究者や技術者が探索救助・偵察監視・サービス用途を見据えた研究開発に効率よく取り掛かれるように，一般に入手可能な市販センサや機器類から構成されるプラットフォームを目指すことである．2つ目は，MATOIのハードウェアとソフトウェアに関する様々な情報をオープンソースとして公開し提供することである．これらにより，研究者や技術者がプラットフォーム開発をゼロからやる必要がなくなるため，より上位の研究開発に時間を割くことができる．その結果，研究開発から実用化へのプロセスの見通しが良くなり，MATOIが各プロセスを繋ぐ橋渡しになると期待できる．これらの開発コンセプトは，第3.1節で示したプラットフォームに必要とされる6つの条件のうちの，汎用性になる．さらに，他の5つの条件は以下のように考慮した．

まず，標準性とモジュラリティ，拡張性，経済性，使いやすさは，極力市販品や標準化されたものを用いることで，条件を満たすことを目指した．また，安全

性は，第2章で示すような，リスクマネジメント体制の実施を目指した．

Summary of JRP Weight Classes

Class							
Small (Light) 31 to 400 lbs	MATILDA 40 lbs	PackBot 40 lbs	ODIS 40 lbs	TALON 80 lbs	T3 110 lbs	EOD MTRS 145 lbs	Quince PackBot
Small (Medium) 401 to 2500 lbs	RONS 600 lbs	SARGE 650 lbs	REDCAR 1000 lbs	GLADIATOR 1600 lbs	Mini-Flail 2500 lbs		MATOI
Small (Heavy) 2501 to 20K lbs	MDARS 2640 lbs	DEMO III XUV 3000 lbs	MULE 5000 lbs	ARTS 8100 lbs	RCSS 11,220 lbs	Smoke HMMWV-CRS 11,500 lbs	Unmanned construction
Large Over 30K lbs	DEUCE-CRS 18 tons	D7G-CRS 28 tons	A-AOE 34 tons	Panther-CRS 40 tons	Abrams Panther-CRS 43 tons		

*No systems currently exist in the Micro (<8 lbs), Miniature (8-30 lbs), or Medium (20K-30K lbs) classes.

Fig. 3-1：Comparison of robots based on “FY2004 JOINT ROBOTICS MASTER PLAN”. [90]

MATOIに放射線災害で重要な機能の一つである，放射線測定機能を搭載することで，環境モニタリングを行える仕様とした．環境モニタリングロボットとしては，日本原子力研究所らが開発した，初期情報収集ロボットRESQ-Aやモニロボ A／B [26] [27]がある．これらは，複数の放射線を高精度で測定が可能であるなどの特徴がある．しかし，連続運転時間が約8時間，移動速度が2～2.4[km/h]であり稼働範囲が限られている．また，研究用とではなく専用装置として開発されているために，研究用の拡張性や使いやすさの考慮はされていない．このため，機能追加や変更が困難であるなど現場のニーズに柔軟に対応しづらく，2011年に発生した東日本大震災の福島第一原子力発電所事故の初動では活用されなかった．さらに，これらは遠隔操作型ロボットであり，自律走行機能は有していない．

災害対応ロボットとしては,福島第一原子力発電所事故対応で実際に使用されたPackBotやTalonなどが,実績がある．これらは,警備・警察・軍事用途など実環境における運用に優れているが，研究開発分野で使用することは価格が高額である問題や，研究用途としての拡張性や，開発のための公開情報が不足しているなどの理由で困難である．

3.3.2 開発フェーズ

MATOIの開発は，第3.3.1項で述べた開発コンセプトに基づいて，以下に示す3つのフェーズ（Fig. 3-2）に沿って進めていく．

Phase1： 第1フェーズでは，ハードウェアとソフトウェアをパッケージ化する．ハードウェアは，SegwayRMP400（セグウェイジャパン）[80]に市販のセンサや機器類を搭載する．ソフトウェアには，産業技術総合研究所から公開・提供されているロボットミドルウェアRTM（Robot Technology Middleware）[10]を利用する．

Phase2： 第2フェーズでは，第1フェーズでパッケージ化したMATOIに実用化に向けた機能を実装していく．例えば，基本的な機能として，無線による遠隔操作（基本機能1，Fig. 3-3 (a)）や，自動巡回のための自律走行（基本機能2，Fig. 3-3 (a)），写真・動画撮影とデータ送信，障害物検知・回避，環境モニタリング，放射線計測が挙げられる．本論文では，これらの基本機能の有用性を検証する実証実験も実施する．
ハードウェア的な要件としては，積載能力の高さ，防塵・防水，耐放射線性といった性能が必要である．防塵・防水は，搭載する各モジュール単位でIP67を目標とした．耐放射線性は，電子機器へのガンマ線照射試験を実施し，最大200[Gy]まで耐えられる仕様を目指す．

Phase3： 第3フェーズでは，より実用的で高度な機能を搭載していく．まず，提案するプラットフォームに作業員を先導・追従・見守り（基本機能3，Fig. 3-3 (b)）する機能を開発し，搭載する．そして，原発内の複数のタスクを同時に進行させるため，複数台の協調制御（基本機能4，Fig. 3-3 (b)）を実装していく．さらに，地理情報システム（GIS）と連携することで，ロボットが実際に走行して取得したデータを地理情報のデータベースに追加できるようにする．

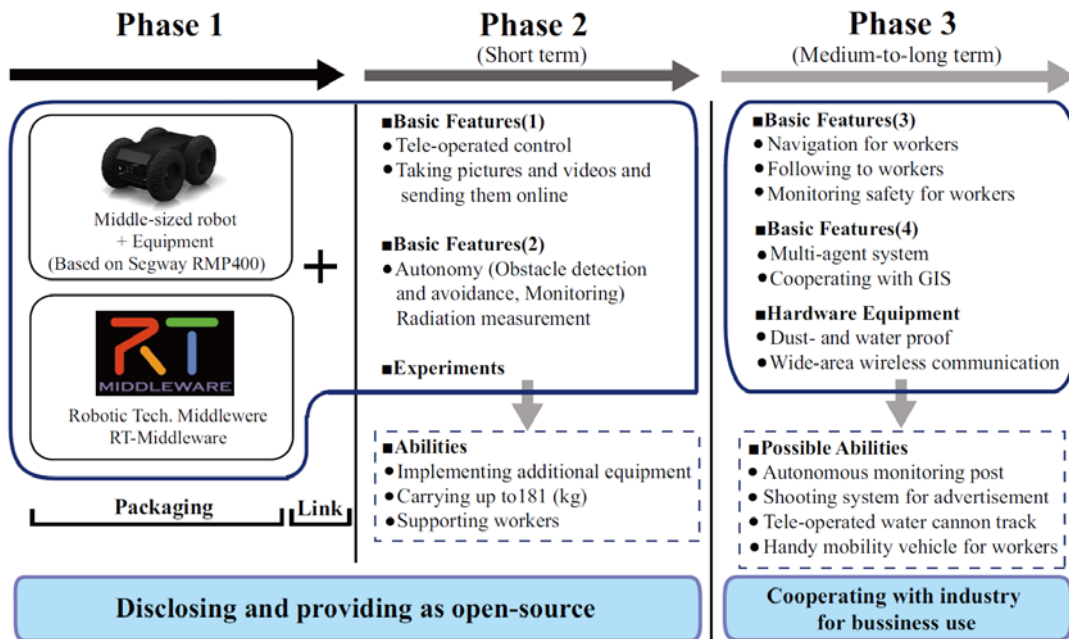



Fig. 3-2: Development scheme of a mobile robot platform MATOI for environmental monitoring

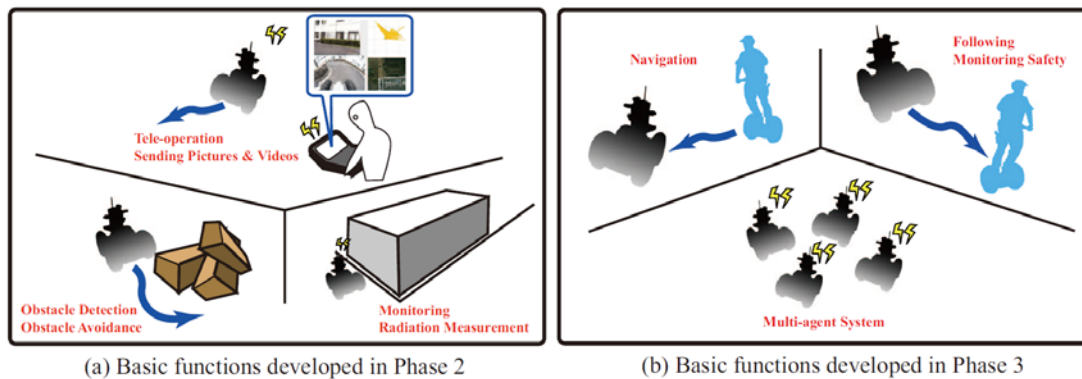



Fig. 3-3: Basic functions of a mobile robot platform MATOI

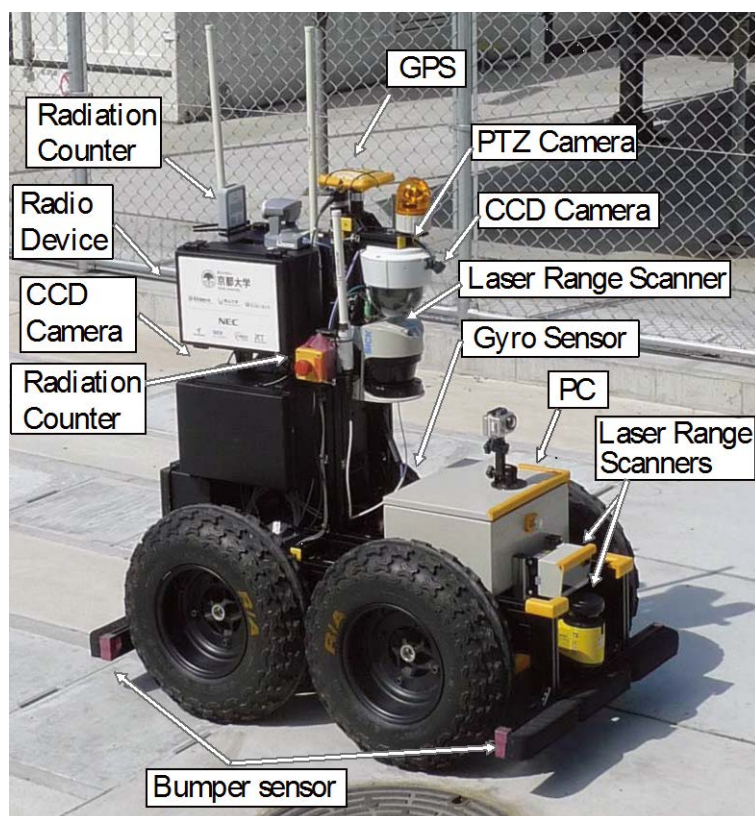



Fig. 3-4: A prototype of a mobile robot platform MATOI

3.4. ハードウェアの構築

本節では，開発したプラットフォームのハードウェア構成について述べる．Fig. 3-4に開発したプロトタイプを示す．

3.4.1 機構設計

MATOIは，遠隔および自律走行機能を持った車輪型移動ロボットプラットフォームである．MATOIは，四輪駆動のSegwayRMP400をベースに開発を行っているため，耐久性やメンテナンス性に優れている．また，不整地においても優れた走破性能を持ち，最大181[kg]までの積載能力を有している．また，最大8時間の走行が可能であるリチウムイオンバッテリーを搭載することにより，広範囲にわたってタスク実行が可能である．

Table 3-2は，MATOIが実現する基本的な機能を示している．MATOIには，実用化に向けて必要となる防塵・防水機能ならびに，耐放射線対応を目指した．

Table 3-2: Specifications of MATOI

Name	*MATOI*
WxLxH [mm]	760x1120x610
Weight [kg]	109
Speed [km/h]	0-30
Range [km]	16-24
Max pay load [kg]	181
A dust- and water proof	IP67
Radiation-proof [Gy]	200
Control mode	4WD tractor mode
Communication	Wire/Wireless LAN
Drive batteries	Four Li-Ion Packs

3.4.2 搭載機器

MATOIは，自律的に走行環境を認識し，自動走行するために市販のセンサや機器を搭載している（Table 3-3）．搭載においては，高いメンテナンス性を持つように構成しているため，センサや機器の追加搭載や構成を変えることも容易である．

遠隔操作やオンラインモニタリングを実行するため，MATOIには次の3つのカメラが実装されている（Fig. 3-4参照）．1つ目は，ロボット自身に搭載されたロボット視点のPTZカメラ（Pan–Tilt–Zoom Camera）である．2つ目は，ロボットおよび，その周囲の環境を俯瞰的に見て遠隔操作を効率的に行うための俯瞰カメラである．3つ目は，ロボット後部の状況を観察するための後部カメラである．これらのカメラから得られる情報をリアルタイムに更新することで，遠隔操作を容易にし，かつ環境モニタリングを可能にする．

環境の情報を得るには，外界センサを使用することも有効な手段である．MATOIには，3つのLRS（Laser Range Sensor）を実装する．環境の地図作成用にLMS-500（SICK社），障害物検知用にLD-MRS（SICK社），非常停止用にS300（SICK社）を実装する．また，ロボットの現在位置は，LEGACY-E+（トプコン社）のGPS（Global Positioning System）を用いて取得する．これら外界センサによって得られたデータはすべてMATOIの走行性能，ナビゲーション，自己位置推定，また衝突回避などの向上に用いられる．さらに，放射線計測をするためにガイガーカウンターを実装した．なお，ガイガーカウンターは，MATOI

の開発時には，PCとの通信機能を有した機種の入手が困難であったために，人が目視で確認するタイプを，Webカメラ経由で操縦者が確認する方式を採用した．

ロボットの内界センサは，MATOIの角速度を計測するために，ロボット本体の中央部にFOG（Fiber Optic Gyro）センサのHOFG-OLC（日立電線株式会社）を搭載した．このデータとGPSから得られる現在位置によってロボットの自己位置推定を行う [91] [92]．

Table 3-3: Device specifications on MATOI

Device	Model	Specificarions
Mobile Platforom	Segway RMP400	Size: 790 x 530 x 1110 [mm] Speed: Max 29[km/h] Battery: Lithium Ion Running distance: 16-24 [km] Operation Time: Max 8 [h]
PC	ADVANTECH ARK-3440	CPU: Intel Core i7 2.53[GHz] RAM: 4[GB] OS: Linux
PTZ Camera	AXIS 213ptz	Size: 30 x 104 x 130 [mm] Video: 704x576、30 [fps] Zoom: x 26 Network camera
LRF(1)	SICK LMS-500	Measuremet ditance: 65[m] Scan angle: 190[°] Laser measurement sensors
LRF(2)	SICK LD-MRS	Measuremet ditance: 0.3-50[m] Scan angle: 85[°] Multi-layer scanner
LRF(3)	SICK S300	Measuremet ditance: 30[m] Scan angle: 270[°] Sefety Laser Scanner
GPS	LEGACY-E+	GPS, GLONASS、D-GPS、RTK-GPS Refresh Rate: 20[Hz]
FOG	HOFG-OLC	Input Range: ±120[deg/s] Bias Stability: ±0.1[deg/s] No-Linearity of Scale Factor: ±1.5[%]

3.4.3 制御装置

MATOIの制御用PCには，ARK-3440（ADVANTECH社，CPU：2.53[GHz] Intel Core i7，RAM：4[GB]）を用いた．オペレーティングシステムには，安定性とリアルタイム性を考慮してLinuxを用いる．さらに，無線LAN通信を採用することで，インターネットへの接続やリモートコントロールを可能にする．

3.5. ソフトウェアの構築

MATOIでは第3.3.3項のように，第2フェーズにおいて，遠隔操作機能（基本機能1）や自律巡回などのための自律走行機能（基本機能2）等の開発を行う．また，第3フェーズでは，先導・追従・見守り（基本機能3）や複数のプラットフォーム間の協調作業機能（基本機能4）の開発を行う．本節では，これら基本機能を開発する上での指針を示し，特にこれまで開発を行った基本機能1，2についてその概要を説明する．

3.5.1 ソフトウェアの開発方針

ソフトウェア開発においてもハードウェアと同様にモジュラリティや拡張性を確保することが重要である．そこで，MATOIの各種機能を実現するソフトウェアの開発にはRT-Middlewareを用い，各機能をモジュール（RT-Component，以降RTC）として実装する．これにより目的や用途に応じて，部分的な入れ替えを実現するとともに，これまで開発されてきた移動ロボット用の機能を活用し，開発の効率化を図る（ [93] [92]）.また，各RTCの入出力については移動ロボット用RTCの共通化インターフェース（IIS）に準拠するように作成する [94]．インターフェースを統一化することで，モジュールの再利用性を向上するとともに，他開発者が容易に独自のモジュールを組み込むことができるようにする．

さらに，開発した各種機能の動作検証においてはシミュレータを活用する．これは，MATOIは比較的大型であり，すべてを実機で検証することは非常に効率が悪いためである．シミュレータには移動ロボット用のシミュレータ".env（dotenv）"（セグウェイジャパン社）を用い，実機とシミュレータ間でのシームレスな移行を実現できるようにRTCを開発する．シミュレータの活用の理由は，主に以下の3点になる．

(1) シミュレータのソフトウェア内で，基本アルゴリズムの検証を実施するほ

うが，実機での試行錯誤よりも効率的である
(2) MATOIのようなクラスのロボットでは，サイズや重量が大きくなり，初期の研究開発時における実機の運用は非効率である
(3) 不安定な動作アルゴリズムで実機実験を実施すると，暴走時などの危険性が高い

このような開発指針に基づき開発を行ったRTC群をFig. 3-5に示す．Fig. 3-5は基本機能1，2の両方を組み込んだシステム構成図である．開発したシステム構成の概要を以降で説明する．

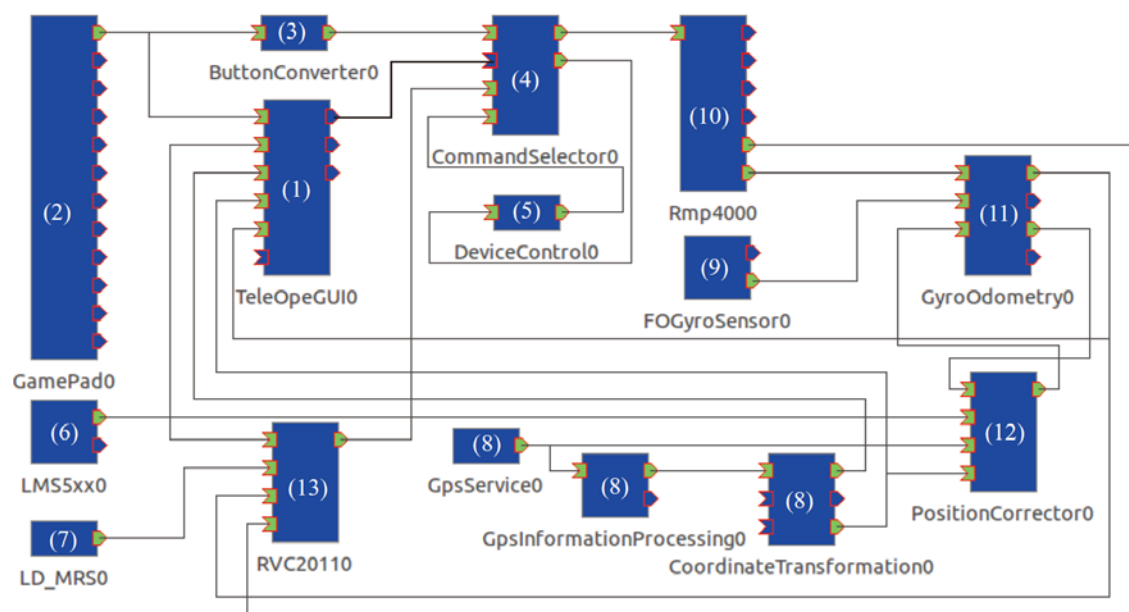



Fig. 3-5: System configuration based on RTCs for basic functions in Phase 2

3.5.2 基本機能1：遠隔操作機能

遠隔操作機能を実現する上で必要となる操作用GUIのRTC，操作入力に関するRTC群，センサ制御用RTC群，ロボット制御用RTCの開発を行った．なお，以下の番号(1)-(13)はFig. 3-5の各RTCの番号を示している．

- 操作用GUI(1)：本RTCは，ロボットから送信されたデータを表示し，操作者に提示するためのRTCである．次節で示すように，オペレータステーションの操作卓にはMATOIに搭載したPTZカメラ画像，正面/背面カメラ画像，LaserScannerのデータなどが表示されており，操作者はGUIを見て操作できるようになっている．また，放射線測定器の情報はこのカメラ画像を経由

して確認することができる．

- 操作入力に関するRTC群(2-5)：本RTC群では遠隔操作のための指令値を生成する．(2)のGamePadと(3)のButtonConverterにより，ゲームパッドから操作者の入力を読み込む．(4)のCommandSelectorは，遠隔操作指令値と次項で述べる自律操作指令値のいずれかを移動ロボットに出力する．その遠隔と自律の切り替えは操作者により行われる．(5)のDeviceControlは,ロボットに設置された，非常停止ボタンからの信号を元に，動作を停止させる．
- センサ制御用RTC群(6-9)：搭載した各種センサからデータを取得するためのRTC群である．LaserScanner用RTC(6，7),GPS用RTC群(8) [91]，光ファイバジャイロセンサ用RTC(9)などがある．
- ロボット制御用(10)：SegwayRMP400本体を制御するためのRTCである．共通化インターフェース（IIS） [9]で入出力を統一したRTC（移動ロボット）であれば容易に置き換えることも可能である．

3.5.3 基本機能2：自律走行機能

本項では，自律走行機能を提供するRTC群について説明する．ここでは，経路情報や環境地図は事前に与えられるという条件のもと，その環境中の自己位置推定を行いながら自律走行（巡回）する機能を実装した．具体的には以下に示すような自己位置推定に関するRTC群と軌道計画を行うRTC実装している．

- 自己位置推定に関するRTC群(11)(12)：GyroOdometry(11)は，ジャイロセンサデータとエンコーダデータに基づき，オドメトリの精度の向上を図るRTCである．PositonCorretor(12)では，あらかじめ設定された環境地図と，現在のLaserScannerやGPSデータを用いパーティクルフィルタに基づき自己位置推定を行うモジュールである [92].
- 軌道計画に関するRTC(13)：本RTCではあらかじめ設定された経路情報に基づき，自律走行のための軌道計画を行い，自律走行指令値を出力する．軌道計画ではLaserScannerから得られた障害物データに基づき障害物回避も行う [95]．さらに，あらかじめ地図上に設定した速度制約領域も考慮可能である [93].

3.6. 開発機能の検証

本節では，Fig. 3-5の遠隔操作機能と自律走行機能を用いて行ったシミュレ

ーション結果と実機実験結果を示す.

3.6.1 実験1：実機による遠隔操作機能の検証実験

まず，遠隔操作機能についての動作結果を示す．ここでは，Fig. 3-6の緑線に示すような経路に沿って（約240[m]）MATOIを遠隔操作し，周囲の環境のデータ収集を行った．操作者が遠隔操作を行う操作卓とロボット間は無線LANで接続し，リアルタイムに送られてくるデータに基づき，操作者が遠隔操作を行うものとした．Fig. 3-7は，遠隔操作に用いたGUIの画面を示したものである．GUIにはロボットから送られてくるカメラ画像やLaserScannerのデータなどが表示されている．Fig. 3-7の操作画面には，(a)正面カメラ映像，(b)俯瞰カメラ映像，(c)障害物検知用のLRSデータ，(d)放射線の線量計を撮影したカメラ映像，(e)ロボットの走行台車のバッテリ・制御系システムのバッテリの各残量を示している．

操作者はこのGUIにより，ロボットの状況や動作を確認することができ，遠隔操作できることを確認できた．また，遠隔操作時に収集したデータをSLAM（Simultaneous Localization and Mapping） [96]に基づき生成した地図をFig. 3-8に示す．SLAMにはオープンソースのDP-SLAM [97]を活用し，自律走行においては，Fig. 3-8に示した自己位置同定に必要なランドマークや経路情報を抽出・設定した．

3.6.2 実験2：シミュレーションによる自律走行機能の検証

次に，自律機能の機能検証を行った結果を示す．自律走行機能の検証は，Fig. 3-6の建物周囲を模擬したシミュレータ（.env）上で行い（Fig. 3-9），赤線のように建物の周囲を5周（約1.9[km]）走行するように設定した．シミュレータの活用は，実環境での試行錯誤の時間の短縮や，開発自体の効率向上を目的したものである．Fig. 3-9の上の画像は，シミュレーター内で動作するMATOIの様子を現し，下の画像はシミュレータ内で，LRSが障害物までの距離情報から作成された地図の結果である．

Fig. 3-10は，そのシミュレーション結果を示したものである．赤線がPositon Correctorモジュールで推定した経路であり，青線がGyroOdometoryモジュールで推定した経路で，黒線は自己位置補正のために設定したランドマーク（建物や壁）を示している．MATOIに搭載されたGyroOdometoryモジュールのみで自己位置を推定した場合には，Fig. 3-6（Route2，赤い点線）に示すような建物の周りを周回する間に，青線のように誤差が蓄積してしまう．しかし，Gyro

Odometeryで蓄積した誤差をPositon Correctorモジュールにより補正しながら自律走行を実現できていることが確認できた．シミュレータでのアルゴリズムの検証（Fig. 3-10）の後に，実機にて動作の確認を実施した．

Fig. 3-6: Routes for experiments

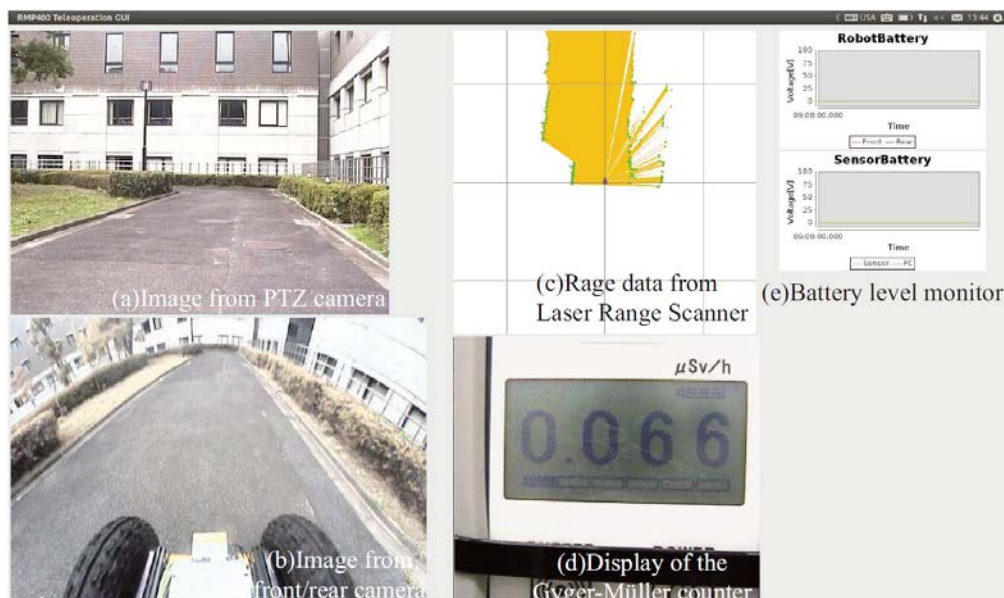



Fig. 3-7: Snapshot of the GUI for teleoperation

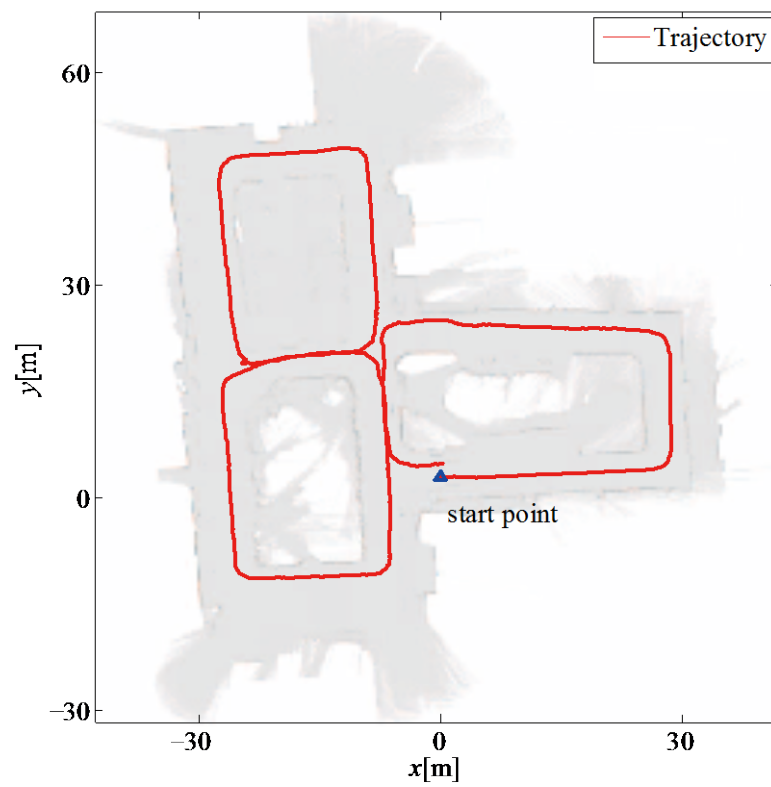



Fig. 3-8: Map generated by experiment based on SLAM technique
(Fig. 3-6 Route 1)

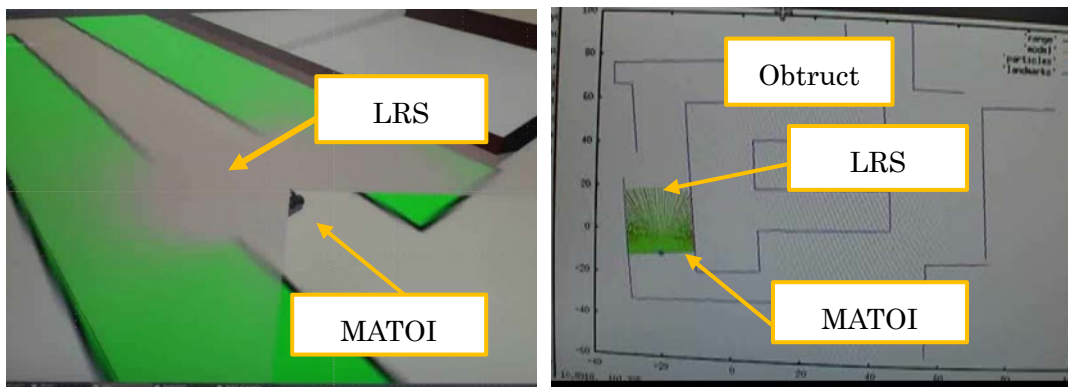



Fig. 3-9: Simulator ".env".

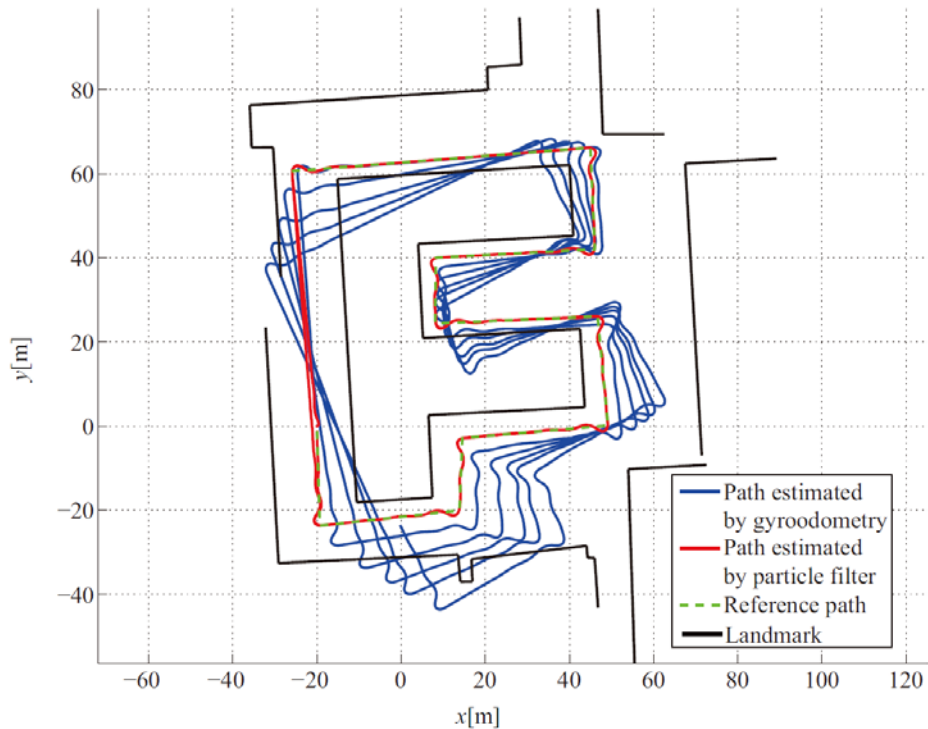



Fig. 3-10: Simulation result of autonomous navigation Result 2 in Fig. 3-6

3.7. 実証実験

本節では，Fig. 3-5に示した遠隔操作機能を用いて，2012年3月19日から3月23日に，中国電力株式会社，日本電気株式会社らとともに，島根原子力発電所構内で実施した実証実験結果を示す．本実験では，前節で示した基本機能の検証と，環境地図の作成を目的とした．

実験は，島根原子力発電所構内の非常用ガスタービン発電機（約20[m]×約50[m]のガスタービン発電機の外周）の周囲及び，島根原子力発電所第三号機建屋外周囲（約100[m]×50[m]の平地）の二つの場所で実施した．なお，これらの実験では，MATOIの移動速度を最大で2.0[m/s]に設定し実験を実施した．Fig. 3-11は発電所での実験の様子を示したものである．Fig. 3-11(b) に示す非常用ガスタービン発電機の周囲を走行し作成された地図をFig. 3-12に示す [97]．Fig. 3-12は，SegwayRMP400内に搭載されたエンコーダーと，MATOIに搭載されたFOGから収集したデータを元に，SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）アルゴリズムを用いて生成した地図の一つである．

この実験により，RTミドルウェアにて構築されたMATOIが実環境においても環境情報を収集し，環境地図の作成が可能であることが確認できた．また，この

実証実験を見学した発電所の作業員らより，MATOIの開発側が当初想定していた緊急対応以外に，日々の巡回警備などのセキュリティ分野などの平時での活用も可能であると意見を頂くこともできた．さらに，開発時から懸念していた，ガスタービン発電機のような，複雑な構造材が多い場所での無線通信装置の通信可能距離の課題なども確認することができた．

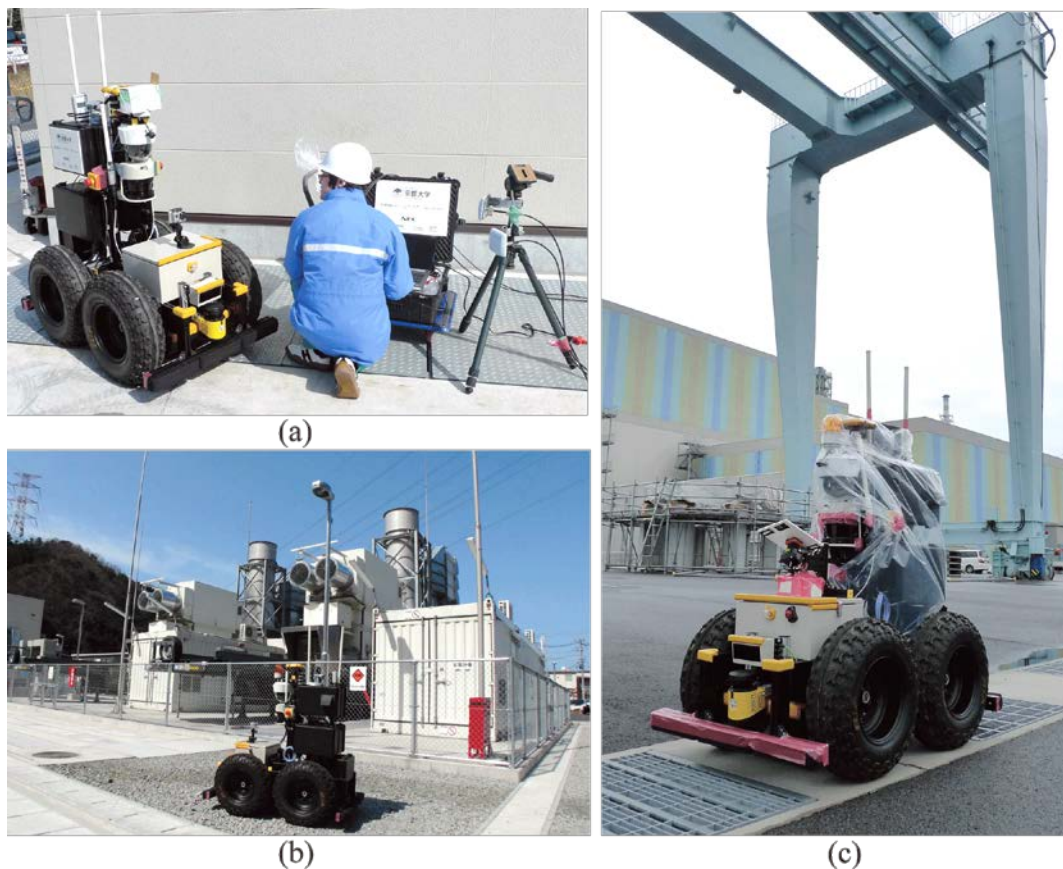



Fig. 3-11: Snapshot of experiments in the nuclear power plant. (a)Operator station, (b)Test around the gas turbine generators, (c) Test around the unit 3 turbine building

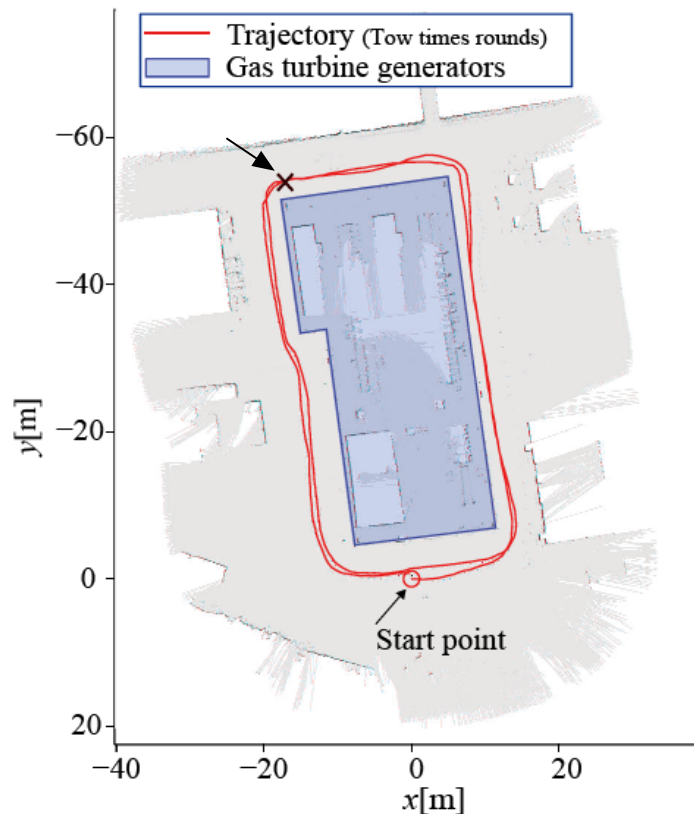



Fig. 3-12: The generated map based on the sensory data obtained around the gas turbine generators.
(o : Start position of the robot, x : camera positon and posture that the image of Fig. 3-11(b) was taken)

3.8 開発の評価

RTミドルウェアなどを活用し試作開発を容易にすることで，早期に実証実験を可能とし実用化の際の課題の共有や，実証実験を通じて開発側が意図しない用途などを確認することができた．このようなモジュール化の考え方を適用し，再利用性を考慮し実用化を目標とした災害対応ロボットの開発の有効性について，同じような車輪型の災害対応の研究開発用を目的としたロボット「FUMA」と，FUMAをベースに商品化された研究開発用プラットフォーム「BlackShip」の事例と比較し検証する．

FUMAは，2004年にRoboCup Rescue実機リーグに参加するために，電気通信大学松野研究室（当時），稲見研究室（当時），日本SGI株式会社らにより開発された研究開発用のロボットである．FUMAは4輪のタイヤと，1本のアームを備

えたシンプルなボディに，3台のカメラと各種センサを装備し，操作はWindowsベースのPCから有線／無線LAN経由で行う構成であった．また，FUMAを元に2005年にはロボットの研究開発用プラットフォーム「BlackShip」が日本SGI株式会社より販売された．MATOIとFUMA，BlackShipの仕様を比較した表をTable 3-4に示す．FUMAは，大学の研究室らが構想設計を行い，企業によって実際の設計が実施されたが，構造設計（機械部品）やソフトウェアなどはすべて新規設計であった．また多くのセンサ類を搭載していたが，MATOIのようなモジュール構造では無かった．また，センサやシステムの追加や変更を前提としておらず，ソフトウェアについても専用開発となってしまっていたために，設計の変更が困難な構成であった．FUMAの開発には，4名程度の開発者（システム設計1名，構造設計1名，回路設計1名，ソフトウェア開発1名）が，フル稼働で4カ月の期間で，約16人月の工数（人数×期間（月）×稼働率）で開発を実施した．

BlackShipは，FUMAを元に日本SGIが移動ロボットの研究者以外でも，容易に移動ロボットを用いた研究ができるように，構造のモジュール化から，センサ類への電源供給や，台車部の制御にはローレベルなシリアル通信の他に，ソフトウェアインターフェース（API：Application Programming Interface）を有した構成としていた．BlackShipの開発には，3名の開発者が（構造設計1名，回路設計1名，ソフトウェア開発1名）が，約7人月で開発を実施した．BlackShipの場合には，FUMAを元としているが，製品化のための作業として，量産性や保守性などにリソースが割かれた開発が行われている．

MATOIの開発には，大学の研究室のスタッフと学生の3～4名が中心となり，開発期間は約半年間程度で，約6人月で開発を実施した．各移動ロボットの開発工数をTable 3-5に示す．用途や目的，開発者のスキルなどの条件が同じでは無いために，同一の比較はできないが， FUMAはMATOIと比べ約2.5倍の工数が発生していることが分かる．これは，ソフトウェアにRTミドルウェアを用いることにより，他の研究開発の成果物の再利用を可能とし，ハードウェアにも市販プラットフォームなどの市販品で構成したことにより，開発の効率化と開発期間の短縮が実現し，提案するシステム設計の有効性が示せたと考えられる．

Table 3-4: Comparison of mobile platform robots

	MATOI	FUMA	BlackShip
Size	L 1120mm W 720mm H 610mm T 533mm	L 640mm W 460mm H 310～800mm T 310mm	L 640mm W 460mm H 310mm T 310mm
Weight	109 [kg]	30 [kg]	20 [kg]
Motor Power	1.5kW × 4	DC 150W × 2	DC 90W × 2
Max Payload	100 [kg]	40 [kg]	40 [kg]
Max Spped	30 [km/h]	1 [m/s]	1 [m/s]
Max Driving time	6～8 [h]	1～2 [h]	2～3 [h]
Mounted sensor	PC, Encorder, LRF, Camera, Acceleration sensor, Speaker, Mic	PC, Encorder, LRF, Camera, IR sensor, Acceleration sensor, , Speaker, Mic	Encorder
Softwaer	Linux, RT−Middleware	Windows (non−middleware) Dedicated application	non−OS non−middleware

Table 3-5 : Comparisons with other research and development mobile platform robots

	(a) Key member	(b) Operating rate	(c) Sint (month)	man−hour ((a) * (b) * (c))
MATOI	4	25%	6	6
FUMA	4	100%	4	16
BlackShip	3	75%	3	6.75

3.8. まとめ

本章は，災害対応ロボットの実用化に向けて，開発時間などを短縮するために，市販品や他で開発されたソフトウェアモジュールを再利用して，共通プラットフォームとなりえる，研究開発用の災害対応ロボットプラットフォーム「MATOI」を構築した．

構築したMATOIは，ソフトウェアコンポーネント開発が可能なRTミドルウェアを用いることにより，他者が開発したソフトウェアモジュールの再利用を可能とし，さらに，モジュール化されたハードウェアも合わせて用いることで，短期間での開発を実現し実証実験を実施することができた．また，MATOIと同じような車輪型の災害対応の研究開発用のロボットFUMAと，FUMAをベースに商品化された研究開発用プラットフォームBlackShipの事例と比較し，MATOIの開発の効率化と開発期間の短縮が実現し，提案したシステム設計の有効性を示した．

これにより開発時の試行錯誤が容易になり，実証実験の経験を積むことで多様性のある災害現場に対して，ロボットの開発が加速することができると考える．また，開発計画に従い，ハードウェア・ソフトウェアの開発を進めるとともに，実際の原子力発電所内での実証実験を実施した．以上よりRTミドルウェアを試作開発のフェーズに適用することで，開発の効率化に寄与するものと考えられる．

現状のMATOIには，災害現場で求められる様々なニーズに対応するため，センサや機器を冗長に搭載している．今後は，構成を精査し，より実環境に適したプラットフォームにしていくことが必要であると考えられる．

第4章

放射線照射実験に基づく
移動ロボット搭載用センサの特性評価

本章では，災害対応ロボットの自律移動などに用いられる4種類のセンサモジュールの耐放射線試験を実施し，耐放射線性能を検証した．実験結果より確認された個々のセンサで異なる破損特性について，災害対応ロボットの各機能の信頼性に与える影響について考察する．

2011年3月に発生した東日本大震災では，原子力災害における災害対応ロボットの重要性が再認識されたが，近年の災害対応ロボットで多用されているセンサ類の耐放射線性能についての報告は多くない．

近年の災害対応ロボットや，自律移動するロボットの多くにはスキャナ式レンジセンサ（LRS: Laser Range Sensor）などの光学系センサが多用されている．LRSは，自動での地図作成や，自律走行，非接触の安全バンパなどの研究開発に使われており，自律移動ロボットには欠かせない機器になりつつある．特に未知環境でのリアルタイムの探索を行う必要性がある災害対応ロボットには必須な機器である．これが動作不良を起こすようなことがあると，安全装置としての信頼性はもとより，障害物検知・回避や地図作成など上位の様々な機能に影響を与える可能性がある．

電子機器は放射線の影響を受けることが知られているが，災害対応ロボットで用いることを想定した，実用的な設計手法や評価方法などについては，文献や資料はほとんど確認ができなかった．これにはいくつかの理由が推測できる．

推測の一つとして，災害対応ロボットのデバイスに，汎用品の流量ではなく，専用開発品を用いている可能性がある．専用開発品であれば，予め定められた仕様を満たすような設計が可能である．しかし，専用で開発するために，時間と開発コストが高くなる問題がある．また，専用開発の場合には，ノウハウも含んでいる場合がり，外部に公開されることは少ない．特に，放射線耐性の試験には，一般的には半年程度の準備期間と，数百万円から数千万円のコスト必要とする．一般公開のためには，これに見合った対価が必要となる．

二つ目に，災害対応ロボットでも多く用いられる，LRSなどの光学系センサが，移動ロボット用途として普及したのは最近であり，放射線耐性の検証や活用の

ノウハウの蓄積が不十分であることも予想される．このため，他のロボットの開発に応用ができない状況である．評価方法が一般化されることで，災害対応ロボットを導入する行政機関や企業などで，機器の選定や仕様決めが容易になるなどの利点が考えられるが，人工衛星向けなど特殊な用途以外では，評価法の標準化は進められていない．

ロボットに用いる事を目的とした，センサ類の耐放射線試験は，1999年に茨城県東海村で発生した株式会社JCOによる臨界事故後に実施された [98]．しかし，試験されたCCDカメラや赤外線センサなどは，現在は入手困難なものがほとんどである．このため，2011年に永谷らにより電子部品の放射線耐性を確認する実験が実施された [99]．ここでは，福島第一原子力発電所の事故対応を目的に，千葉工業大学，東北大学，国際レスキューシステム研究機構らが共同で開発を実施した災害ロボット「Quince」[84]の汎用電子部品（PCボードやセンサ，モータドライバなど）を対象とし，コバルト60ガンマ線照射装置を用いた試験が実施された．その結果，100～200[Gy]程度まで放射線照射に耐えられることが確認されているが，福島第一原子力発電所事故で利用するQuinceへの搭載を前提とした，小型のロボット用の電子部品が中心であった．したがって，一般的に災害対応ロボットに用いられる電子部品や，センサ類などの放射線耐性の定量的な評価方法の検討が必要である．

一方，災害対応ロボットを対象にした，性能評価法や安全性の確認方法などについての標準化活動が米国を中心に行われている [37]．これらは軍や警察，消防などが，災害対応ロボットを実際に導入する際の指針として検討されているものであり，日本でも消防庁や日本ロボット工業会などを中心に検討がされている [18] [19] [48]．しかし，これらの標準化活動において，現段階においては放射線関連についての検討は進んでいない．

そこで本章では，災害対応ロボットの実用化に必要な考慮すべき開発情報の共有がされにくい問題について考察する．災害対応ロボットには，防水性や走行性などいくつかの基本機能が必要となる．災害対応ロボットに必要な，機能や性能評価の研究は進んでいる．この中でも，放射線耐性に関する情報は不足しており，研究開発時に考慮していない機能を，実用化の段階になってから対応を検討するのでは，非効率である．しかし，電子部品の放射線性能評価には多額のコストが必要で，開発企業のノウハウとなり情報が共有されにくい．そこで，災害対応ロボットの自律移動などに用いられるセンサモジュールの耐放射線試験を実施し，耐放射線性能を検討し，この情報を論文として公表することで共有することを試みた．ここでは，災害対応ロボットの自律移動機能や安全用センサとして多用されている 4 種類のレーザーレンジセンサに対して，耐放射線性能実験を実施した．さらに，実験結果より確認された個々のセンサで異なる破損特性につ

いて，災害対応ロボットの各機能の信頼性に与える影響について考察し，取るべき方策について検討した．

なお，本論文中の「放射線」とはガンマ線を想定し，吸収線量を表す単位の計数は，1 [Gy] = 1 [Sv]として換算した．

4.1. 災害対応ロボットに必要な電子部品の放射線耐性について

災害対応ロボットは，福島第一原子力発電所における事故対応などからも放射線に対する耐性を有する必要がある．通常の電子部品は放射線に対して，脆弱であることが知られている．電子部品の放射線から受ける影響について次に示す．

4.1.1 電子部品の放射線耐性について

自然界に存在する放射線には，アルファ線，ベータ線，ガンマ線(X線)，中性子線などがある．それぞれ，遮蔽に対する透過性に違いがあり，この中で移動ロボットに用いられるような，半導体などの電子部品に影響を与える放射線は，アルファ線と中性子線である.各放射線の遮蔽イメージをFig. 4-1に示す．

放射線が半導体チップに入射した場合は，電離効果と，はじき出し損傷効果の，二つの変化が起こるといわれている [100]．電離効果は，徐々に劣化していくハードエラー（恒久的な故障）と，一時的な誤動作を起こすソフトエラー（一時的な故障）となる．電離効果による作用は，トータルドーズ効果とシングルイベント効果である．これらが半導体などの電子デバイスに動作不良や誤動作の原因となり，ソフトエラーを発生させる原因となる．放射線が半導体に与える主な影響を以下に示す [101].

(1) シングルイベント効果（SEE : Single Event Effect）

1個の高エネルギー粒子（中性子，陽子，重イオンなど）の荷電粒子が半導体チップ内を通過したときに起こる，照射誘起過度電流による誤動作・損傷の現象で，一時的な誤動作（ソフトエラー : 再起動やデータの書き換えで復旧）や，損傷（ハードエラー : 素子を破損させる永久故障）を起こす.

(2) トータルドーズ効果（TID : Total Ionizing Dose）

荷電粒子，あるいは電磁波を半導体チップが浴び続けることによる累積効果として半導体デバイスの電気的特性を劣化させる現象．シングルイベント効果に比べ，低エネルギーの放射線でも発生する現象．プロセッサやメモリなどのMOS型半導体デバイスに見られる症状で，次のような現象を発

生させる.

・　不良症状は性能劣化で，最大動作周波数が低下
・　トランジスタのリーク電流の増加
・　トランジスタのしきい電圧の変化
・　メモリのデータ保持期間が短くなる

(3) はじき出し損傷効果（DDD：Displacement Damage Dose）

　半導体チップ内に，電子線や陽子線（プロトン），中性子線などの粒子が突入し，半導体の原子核に衝突して玉突きのように原子核をはじき飛ばし，リーク電流の増加や，素子の特性劣化を引き起こす．半導体デバイス全体に影響を与える効果で，LEDなどの発光デバイス，太陽電池などの受受光デバイス，CCDなどのイメージセンサ，オペアンプなどのリニアICなどの特性が変化現象.

・不良症状としては性能劣化で，TID効果と類似している現象.
・TID効果が電荷による電気的な効果を意味しているのに対し，DDDは粒子線と半導体原子の物理的な衝突による作用を指す.
・プロセッサやメモリなどの半導体チップではDDDは起こりにくい現象.

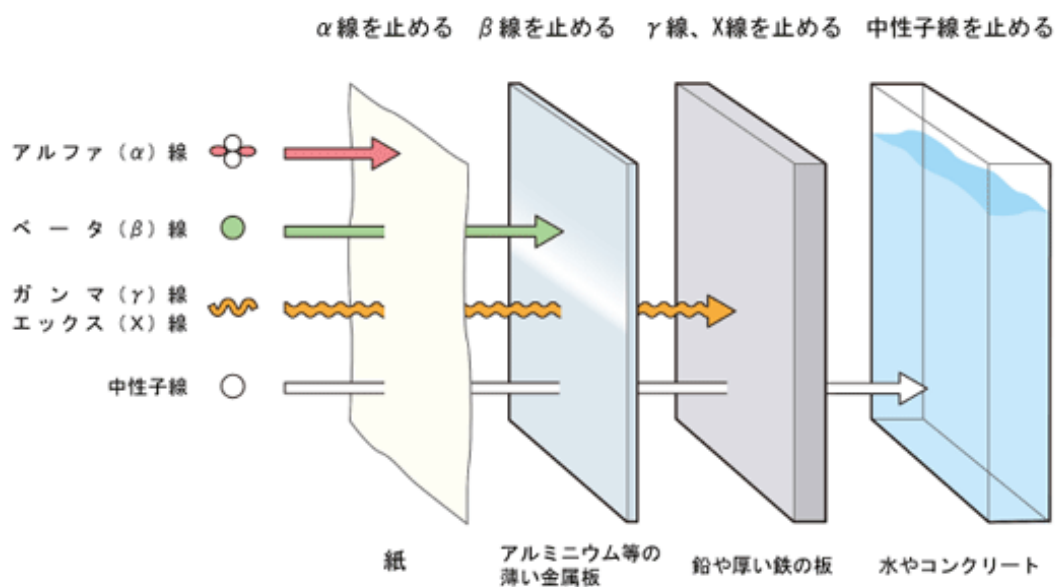



Fig. 4-1：Shielding with each radiation [102]

4.1.2 放射線耐性を有する電子部品の開発状況の課題

一般の機器に使用される，産業用や民生用の製品（COTS：Commercial Off-The-Shelf）は，放射線に対する耐性が仕様として記述されていない．宇宙用部品向けなど耐放射線仕様の半導体製品は存在し販売はされている．しかし耐放射線仕様の半導体製品は通常品に比べると，品種数が少ないといった弱点がある．そこで航空・宇宙用電子機器の開発コストを下げるために，比較的安価なCOTSの半導体製品を採用する動きが活発になってきている［103］［104］．しかし，COTSの半導体製品には，放射線の耐性に対する要求仕様が求められていないために，放射線耐性に関するデータが存在してないことが問題となっている．

米国の航空・宇宙産業では，NASA（The National Aeronautics and Space Administration）やNASA傘下のJPL（Jet Propulsion Laboratory），国立研究所，大学，企業などが協同で，産業用や民生品の半導体製品の放射線耐性を評価し学会（プロセッサやメモリなどの半導体チップの放射線対策技術に関する世界最大の国際学会（NSREC：Nuclear and Space Radiation Effects Conference），半導体チップの信頼性に関する国際学会（IRPS：International Reliability Physics Symposium））などで発表する取り組みが行われている．

一方，宇宙産業や軍事産業などでは，部品の評価法の標準化が進められている．米軍が開発した電子機器の信頼度予測方法が示されており［105］，欧州のESCC（European Space Components Coordination）からはトータルドーズ効果の評価法などが示されている［106］が，これらの評価を実施した製品には，いくつかの課題がある．

一つ目に，人工衛星をはじめとする，宇宙用に評価された放射線耐性を有する専用設計された部品は価格が高く，一般的には入手性が悪い（例えば，一般的な携帯電話に搭載されているようなスペック程度のCPU基板でも，数百万円ほどのコストとなり，標準在庫品でない部品が多い）．

二つ目に，宇宙開発に代表される，放射線耐性が必要な機器は，保守的に設計されているため，COTS製品に比べると性能が劣る．さらに，放射線耐性を必要とする製品の市場規模は，自動車や産業機械用などと比較すると市場規模は極端に小さい．COTS品は部品の流通期間が短く，開発後（数年後）の入手性の保証がないが，宇宙，航空，防衛分野では，製品出荷保障が10年程度などの特徴がある．

さらに，米国などは技術戦略的に耐放射線を有する高性能半導体の技術情報や製品そのものの輸出を制限しているなどの問題もある［107］．

このような状況のため，米国の航空・宇宙産業では，学会などでの情報の共有化が進められている．日本においても，JAXA（独立行政法人宇宙航空研究開発

機構）が一部の放射線耐性を有する部品リストをWeb [108]などで公開している．しかし，これらの部品は専用設計品に比べれば安価であるが，市場規模が小さいために，一般的な製品と比較すると，価格は高額であり，入手性も悪い．また，評価・試験，専用開発には数百万円～数千万円のコストが必要である．日本でも放射線耐性を有する部品情報を共通する取り組みが進められているが［109]，メーカーのノウハウになっているのが実情である．このため，災害対応ロボットの開発者や，研究者による耐放射線を有する電子部品の利用は困難な状況であった．

4.1.3 移動ロボット用機器の耐放射線性能評価に関する先行研究

災害対応ロボットの開発者や研究者による，耐放射線性能を評価する研究・実験は多くなく，財団法人製造科学技術センター（MSTC）［98]と，永谷ら［99]により報告されている程度に留まっている．電子部品に対する放射線耐性を確認した主な実験結果の一部をTable 4-1に示す．ここで，電子機器の放射線耐性があることは，ロボットの連続稼働時間が延びる事を意味する．放射線耐性は一般的に「積算線量（Total dose)」と「吸収線量率（Absorbed dese rate)」で表され，積算線量は放射線が電子機器に対して影響を与えた総量（Gy）を示し，吸収線量率は単位時間当たりの放射線によって，機器に吸収されるエネルギー量（Gy/h）を示す．これらの値が大きいほど放射線耐性があることになる．

製造科学技術センターの試験では，CCDカメラ（4台），赤外線カメラ（1台），モータ制御回路，CPU制御回路，ノートパソコン（4台）を対象にトータルドーズ効果と，シングルイベント効果について評価された（Table 4-1(a)）．実験中の様子をFig. 4-2に示す．トータルドーズ効果は，ガンマ線照射装置にて実験が行われ，吸収線量率10 [Gy/h]の環境で，2時間の作業を想定し，積算線量が20 [Gy]以上での動作確認を目標として実験が実施された．しかし，機器がこの線量率以下で影響を受ける可能性もあることを考慮して，照射は低線量率（1 [Gy/h]）から開始された．さらに，線量率10 [Gy/h]で2時間の照射で異常がない場合は，約40 [Gy/h]ないし約80 [Gy/h]で最大積算線量200 [Gy]まで照射することが計画された．この結果，ガンマ線照射試験では，Table 4-1 (A)に示す，CCDカメラ，赤外カメラ，モータドライバ，CPUボードおよびコントローラのいずれも20 [Gy]（10 [Gy/h]×2 [h]）の照射では異常は発生しないことが確認された．

また，千葉工業大学および東北大学らによる共同開発の災害対応ロボットQuinceに搭載された，汎用電子部品で構成された電子回路（PCボード等）について，日本原子力研究開発機構高崎研究所のコバルト60照射施設で，トータルドーズ効果を対象に，東北大学らにより照射試験が実施された．実験の様子を

Fig. 4-3に示す．その結果，約200 [Gy]まで放射線照射に耐えられることが確認されている．また，同時にQuince用センサ，モータドライバ等を200 [Gy]まで照射した結果，LRSなどについて，照射中に故障が確認されている．LRSの積算線量と吸収線量率の結果をTable 4-1 (B)に示す．この実験では，製造科学技術センターの実験において50 [Gy]付近でノートパソコンが故障した事例から，当初は50[Gy]付近での故障を前提に100 [Gy]までの試験を想定されていた．しかし100[Gy]の試験後も故障が確認できなかったために，200[Gy]が最終目標とされた．これらの実験で目標とした，積算線量と吸収線量率をTable 4-2に示す．（製造科学技術センターが実施した実験の，線量率・照射時間の目標設定値の設定意図については確認ができなかった.）

さらに，原子力施設向けのロボットや，放射線の影響を受けることを考慮したロボットを対象に，それらの積算線量と吸収線量率について調査した．その結果，国内外の40台のロボット（非公開情報含む）を確認することができ，この中で積算線量の限界値の記載があるロボットが25台，吸収線量率の限界値の記載があるロボットは9台（うち，積算線量と並記が7台）であった（Fig. 4-4）．積算線量と吸収線量率の内訳をTable 4-3に示す．

国内では，2001年に製造科学技術センターらにより開発された「原子力防災支援システム」では10 [Sv/h]（Gy/h）の環境において2時間以上での動作を目標とした開発がされており [110]，積算線量の耐性が10～10,000[Gy]（一部部品交換前提）であるロボットが開発されている [111] [112].

Table 4-1: Experimental results in the previous studies
(A) MSTC, (B) Tohoku UNIV. et.al.

From Experiment (A)

Sensor	Total dose [Gy]	Absorbed dose rate [Gy/h]
CCD Camera (total of 4 camera)	119-231	1 10 40 80
Infrated Camera	110	
Motor driver	222	
CPU board	100	
Laptop PC （total of 4 PC)	23-93	

Experiment (B)

Sensor (LES)	Total dose [Gy]	Absorbed dose rate [Gy/h]	Time
UXM-30LN-P	229	40	5h
URG-04LX	124	40	2h49m
UTM-30LX	225	40	5h

Fig. 4-2 : Experimental by (A)MSTC. [98]

(a) Tracked vehicle Quince: Fukushima version.

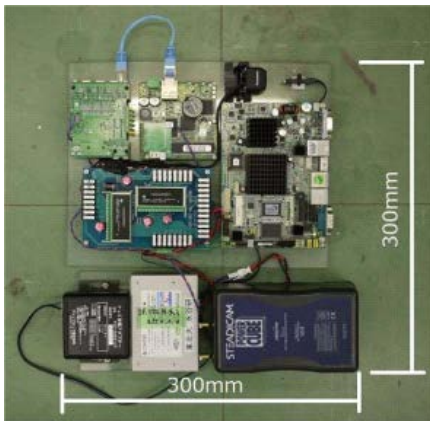
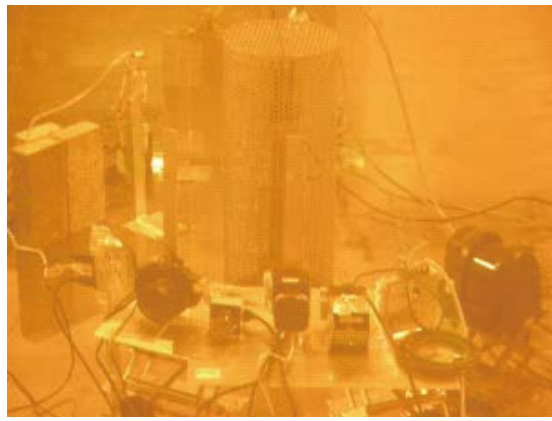
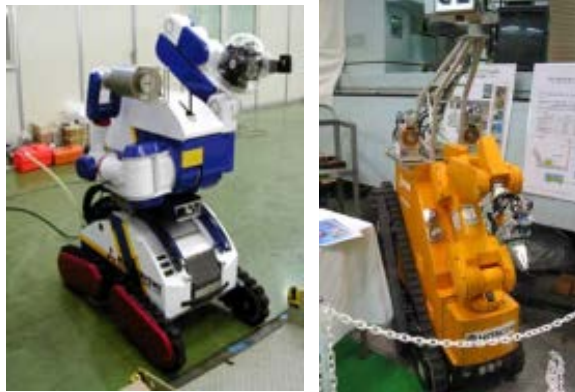
(b) Device configuration for gamma-ray irradiation test.

(c) CPU board with some electric devices and CCD camera.

(d) Overview of gamma-ray irradiation test.

Fig. 4-3: Experiment by (B) Tohoku Univ. et.al [99]

(a) METI, Manufacturing Science and Technology Center
“Nuclear Accident and Robotics Project, 2001”
Total dose 20[Gy], Absorbed dose rate 10[Gy/h]

(b) MEXT, Japan Atomic Energy Agency
“Remote Surveillance Squad, 2001”
Total dose 20[Gy],
Absorbed dose rate 10[Gy/h]

(c) CYBERNETIX
MENHIR
Total dose 10,000[Gy],
Absorbed dose rate 100[Gy/h]

Fig. 4-4 : Robots with Radiation resistance
(a) [113], (b) [114], (c) [110]

Table 4-2: Experimental condition of the previous studies
(A) MSTC, (B) Tohoku UNIV. et.al.

(A) Experimental conditon

Total dose [Gy]	Absorbed dose rate [Gy/h]
20	1
	10
200	40
	80

(B) Experimental condition

Total dose [Gy]	Absorbed dose rate [Gy/h]	Time [h]
100	20	5
200	20	10
200	40	5

Table 4-3：Classification of robots with respect to total dose and absorbed dose rate

Total dose	Number of robots
20 Gy or less	3
20 - 99 Gy	4
100 - 499 Gy	8
500 - 999 Gy	0
1000 - 9999 Gy	2
over 10000 Gy	6
Total	25

Absorbed dose rate	Number of robots
10 Gy or less	2
10 Gy/h	5
100 Gy/h	1
Total	9

4.2. 災害対応ロボットに必要な耐放射線性能の評価方法の検討

4.2.1 本研究における実験の位置づけ

福島第一原子力発電所事故のような災害現場で用いられている，災害対応ロボットには放射線からの影響を考慮した部品選定や設計が必要になり，部品選定にはいくつかのレベルがある．部品選定と開発のレベルを示した図をFig. 4-5に示し，それぞれの特徴と課題を以下に示す．このうち，本研究では「(3)COTS製品，モジュールの評価，追加の保護法策」を対象とする．

(1) 電子部品からの専用設計・開発

人工衛星など，長期間放射線下にさらされる宇宙機器の研究開発では，開発に長期間の時間を必要とする．また，放射線の耐性試験には，多大なコストが必要になるが,製品の出荷数量が少ないために製造コストが上昇するなどの課題がある．災害対応ロボットに搭載する電子部品においても，放射線からの影響に考慮することが望ましいが,すべての電子部品に対応することは開発コストの増加に繋がる．

(2) 電子機器モジュールからの専用設計・開発

人工衛星向けに専用設計された,電子機器がモジュールなどになって市販されているが，金額が高額である．(1)で構成された部品でモジュールの場合には非常に高額となるが，COTS品をベースにしている場合には安価になる場合がある．基本的には，放射線を考慮した電子部品で構成されているために，放射線耐性の検証が容易である．

(3) COTS 製品，モジュールの評価，追加の保護法策

福島第一原子力発電所事故の対応に用いられた，災害対応ロボットQuinceなどは，一般に流通している市販の電子部品が用いられ開発された．したがって，市販のセンサなどの電子部品が，どれだけ放射線に耐えられるかのテストが実施する必要があった．災害対応ロボットでは，人工衛星ほどの軽量化は求められないため，放射線に弱い電子部品に対して，鉛など重金属などで追加の保護方策により対応が可能である．しかし，カメラやLRS（Laser Range Sensor）など，電子部品が暴露する必要があるセンサは，保護方策が困難である．

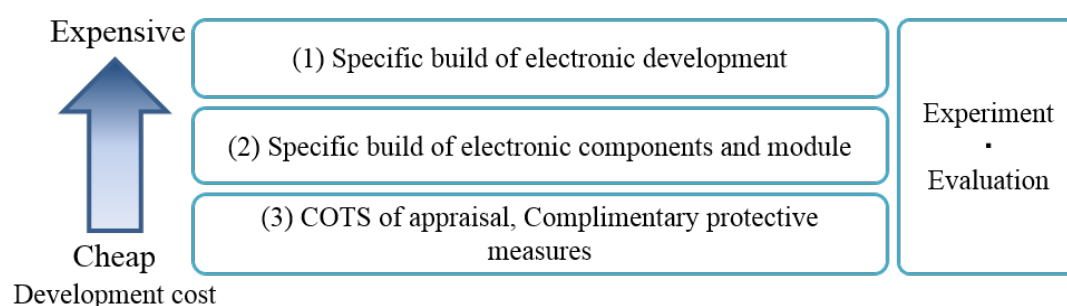



Fig. 4-5：The level of component selection and development considering radiation resistant design.

4.2.2 本研究の目的

本研究では，災害対応ロボットの実用化に必要な考慮すべき開発情報のうち，放射線耐性を有する部品選定の情報共有不足による開発の非効率性に焦点をあて，これを解決する方策について提案することを目的とする．

本研究では移動ロボットの自律移動機能や安全用センサとして，一般によく使用されている光学系センサである，Fig. 4-5の(3) COTS製品の利用を前提とし，これらにガンマ線を照射する実験を実施する．この様な放射線照射実験を進めることにより，耐放射線性能を有するCOTS製品の情報が流通し，放射線耐性の向上のためのノウハウが共有され，災害対応ロボットの実用化が促進されと考えられる．

4.3. ガンマ線照射実験

本実験では移動ロボットに多用され，実験時に入手可能であった合計4機種のLRS（SICK社製 LMS511，LMS100，LD-MRS，北陽電機社製 UTM-30LX）各1台に対して放射線照射試験を実施した．実験に試用したセンサの仕様をTable 4-4に示す．制御用の機器であれば，放射線からある程度遮蔽することが可能であるが，光学系のセンサはセンサ部分を暴露させる必要がある．このために放射線の影響を大きく受ける可能性が高いと考えられる．本論分では光学系のセンサで多用されるLRSを対象として実験を実施した．なお，実験の精度を向上させるためには，同型の機器を複数台用意し，同時に実験するなどが望ましい．しかし，今回の実験では機器の入手性や，今後の課題について検討するための予備実験であることなどの理由から，各1台での実験とした．

本実験におけるセンサに照射する積算線量と吸収線量率は，Table 4-1とTable 4-2に示す先行研究の参照事例，原子力施設向けのロボットを対象に調査した積算線量と吸収線量率を示した（Table 4-3）などを参考にし，Table 4-5のように定めた．今回の実験では，積算で500[Gy]以上（Category 3）でセンサが停止することを想定した．このため，Category2までは先行研究の検証と，吸収線量率の違いによる挙動の確認を目的として数値を設定した．さらに，今回の実験では，センサの破損限界値の目安が不明であったために，センサが測定不能になるまでの限界値を確認することを目的の一つとした．

また，各カテゴリの吸収線量率で照射の際には，各センサに均等にガンマ線を照射することや，ガンマ線の照射方向に対する影響の違いも確認することを目的に，Fig. 4-7のように実験途中にセンサを回転させ（非照射時に作業），各センサの6面（(1)上，(2)下面，(3)左，(4)右面，(5)前，(6)後面）に対してガンマ線を照射した．

このように，ガンマ線に影響される電子部品はセンサごとに配置が異なるために，実験中に照射面を変えることで，均一に照射させることが期待できる．特に，線源（コバルト60）とセンサが設置された位置に近づくほど，線量率は指数関数的に上昇するため，線源に向かってセンサの前方側と後方側とでは，線量率が変わってしまう．例えば，線源からの設置距離が42 [cm]の線量率は200 [Gy/h]であり，線源から50 [cm]の線量率は約167 [Gy/h]，40 [cm]で約236 [Gy/h]となる．例えば，LMS511の本体サイズは「159×155×185[mm]」であり，前方と後方では，約70 [Gy/h]以上の吸収線量率が変わってしまうことになる．

さらに，第4.1.3項で示した東北大学らの実験では，内部の電気的な構造が同じで，機械的な構造は違うセンサにおいて，ガンマ線の照射中のセンサの出力傾向が違うことが確認されている．各センサの個体差も考えられるが，この実験で

はセンサの測域面は天井を見るような上向きで，センサの下部が線源を向くように設置されていた．一方のセンサには放熱用に本体下部に，厚さが約1[cm]程度のアルミ板が設置され，もう一方は樹脂製の外装のみであった．このため，センサへの照射方向により違いが生じた可能性もあり，この点の確認も目的の一つとした．

Table 4-4：Specification of LES for Experimental

Model	SICK LMS511	SICK LMS100	SICK LD-MRS	Hokuyo UTM-30LX
Field of view	190 °	270 °	85°	270 °
Angular resolution (°)	0.5	0.5	0.5	0.25
Step	381	541	170 (4Layer)	1081
Measurement Resolution	-	-	40mm	1mm
Systematic error	± 25 mm (1 m ... 10 m)	± 25 mm (1 m ... 10 m)		±30mm (0.1～10m)
Statistical error σ	±9㎜ (10…20m	±9㎜ (10…20m	±100mm	±50mm
3σ	±27㎜	±27㎜	±300mm	±150mm
Weight	3.7 kg	1.1 kg	1kg	0.2kg
Enclosure rating	IP 67	IP 65	IP68	IP64
Supply voltage	DC 19.2～28.8 V	DC10.8 ～30 V	DC 9～27V	DC 12V
Power consumption:	22 W	20W	10W	8W
Dimensions	160 mm 155 mm 185 mm	105 mm 102 mm 152 mm	88 mm 164.5 mm 93.2 mm	60 mm 60 mm 87mm
Ambient operating temperature:	-30 ℃ ～ +50 ℃	0 ℃ ～ +50 ℃	-40℃ ～+70℃	-10 ℃ ～ +50 ℃

Table 4-5 : Total dose and absorbed dose rate for experiments.

<table>
<tr><th rowspan="2">Category</th><th colspan="2">Absorbed dose rate</th><th rowspan="2">Time
[min]</th><th rowspan="2" colspan="2">Total
dose
[Gy]</th></tr>
<tr><th>Plan
[Gy/h]</th><th>Installation
distance
[cm]</th></tr>
<tr><td rowspan="2">1</td><td>10</td><td>194</td><td>12</td><td>2</td><td rowspan="2">10Gy</td></tr>
<tr><td>20</td><td>133</td><td>24</td><td>8</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2</td><td colspan="3">Gate1 Total dose</td><td>10</td><td rowspan="3">100Gy</td></tr>
<tr><td>50</td><td>80</td><td>48</td><td>40</td></tr>
<tr><td>100</td><td>61</td><td>30</td><td>50</td></tr>
<tr><td rowspan="3">3</td><td colspan="3">Gate2 Total dose</td><td>100</td><td rowspan="3">500Gy</td></tr>
<tr><td>100</td><td>61</td><td>120</td><td>200</td></tr>
<tr><td>200</td><td>42</td><td>60</td><td>200</td></tr>
<tr><td rowspan="2">4</td><td colspan="3">Gate3 Total dose</td><td>500</td><td rowspan="2">1000Gy</td></tr>
<tr><td>200</td><td>42</td><td>150</td><td>500</td></tr>
</table>

4.3.1 実験手順

本実験には，京都大学 原子炉実験所「コバルト60ガンマ線照射装置」を用いた [115]．この装置では，最大放射能強度 414×10^{12} [Bq]，線源は最高で約30,000 [Gy/h]の線量率での照射可能となっている．

各センサには，Table 4-5に示す各カテゴリの目標とする積算線量のガンマ線を，各吸収線量率と時間で照射し実験を実施した．例えば，Category 1の場合には，目標とする積算線量の合計値を10 [Gy]とし，これに対して，吸収線量率10 [Gy/h]と，20[Gy/h]で照射した．10[Gy/h]で合計12分間照射することで，積算線量は2[Gy]となる．さらに20[Gy/h]で24分間の照射で8[Gy]の積算線量となり，合計で10[Gy]の積算線量での動作を確認する．センサの設置位置は，京都大学原子炉実験所であらかじめ作成された，日別減衰率一覧表を元に，実験が実施された2011年12月8日に，各目標とする吸収線量率になる位置を算出し定めた．Fig. 4-6に各吸収線量率に対する，各センサの設置位置などを示す．各センサの設置位置は，線源を中心に同一円周状になるように設置した．センサには，照射量の確認のため，照射量測定試験体（アミノグレイ） [116]を各センサの前面側に各1個を設置した（Fig. 4-7）．Fig. 4-8に照射試験の概観を示す．

前述のように，実験では各センサの6面に対し均等にガンマ線の照射を実施した．具体的には，Category 1の吸収線量率10 [Gy/h]においては12分照射するが，各面に2分ずつの照射として2分おきに照射を停止させて，センサの面を置き換えた（Fig. 4-9）．そして再び照射することで，合計12分の照射とした．

今回実験に用いたLRSは，一定のスキャン角度範囲に対して，各センサで定め

られた角度分解能で，距離を測定している．例えば，LMS511では，スキャン角度190度の範囲を，角度分解能（1ステップ）を0.25度/0.5度/1度単位で，測定することが可能であり，1スキャンで最大760ステップから190ステップの距離を測定することが可能である．さらに，各センサのシステム的なエラーや統計的誤差が明らかされている．LMS511のシステムエラーは1～10[m]の範囲では±25[mm]，10～20[m]の範囲では±35 [mm]，統計的誤差は1～10[m]の範囲では±7[mm]，10～20[m]の範囲では±9 [mm]と仕様表に示されている．今回の実験室の最大距離は約7m程度であったため，LMS511では，統計誤差の±9[mm]（カタログ値より）の3倍の±27[mm]以上出力値が変化した計測点をノイズと定めた．なお，ノイズの定義については第4.3.2項に示す．

実験中は，各センサの出力を外部パソコンでモニタリングし記録，動作確認を行う．センサをパソコン側で認識できている間は，センサの値を記録し続けた．パソコン側が認識できない状態としては，COMポートが認識しない，pingの返答がないなどが考えられ，このような状態になった場合には，センサが故障などにより測定不能であると判断した．さらに，LMS511 / LMS100 / LD-MRSについては，センサ本体に正常な値を出せないと判断した場合に，エラーメッセージを出力する機能があるため，エラーメッセージを出力した時点で，測定不能と判断することとした．また，UTM-30LXには，各ステップにエラーメッセージを出力する機能があるため，すべてのステップで定常的にエラーメッセージが出力された際には測定不能とした．

測定不能と判断した場合には，一旦ガンマ線の照射を停止し，測定不能となったセンサとアミノグレイを回収し，アミノグレイの照射量の確認を行い，センサに照射された積算線量とした．

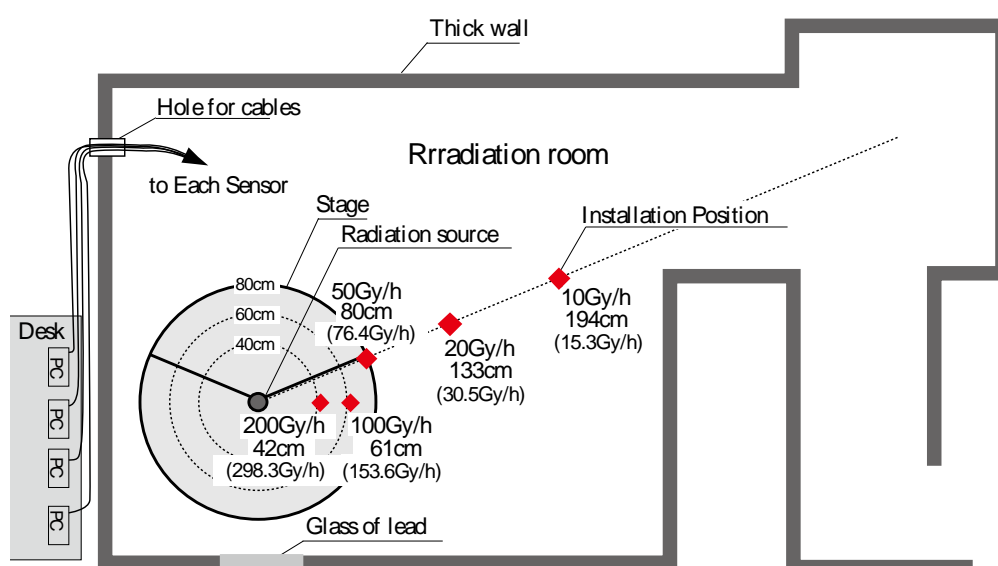



Fig. 4-6: Layout of devices and experimental facility.

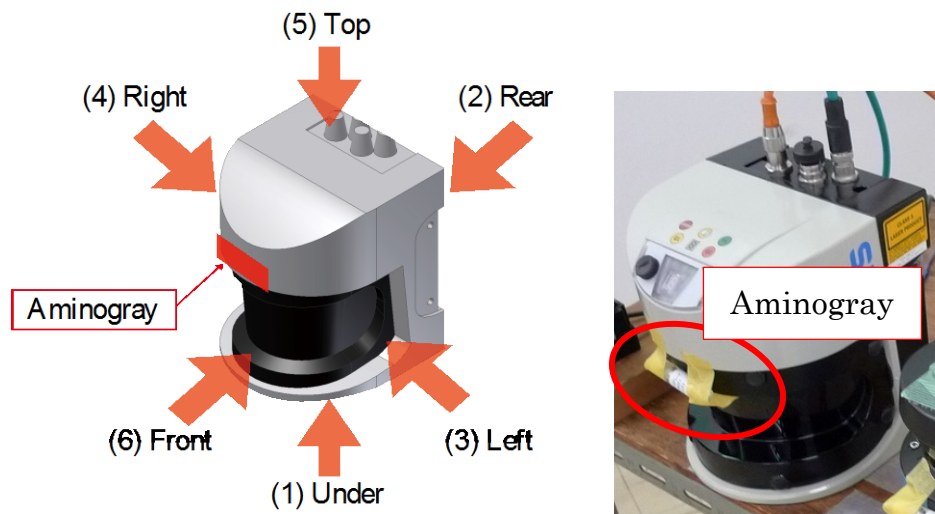



Fig. 4-7: Experimental set-up
(Left) Change of irradiation direction
(Right) location of Aminogray

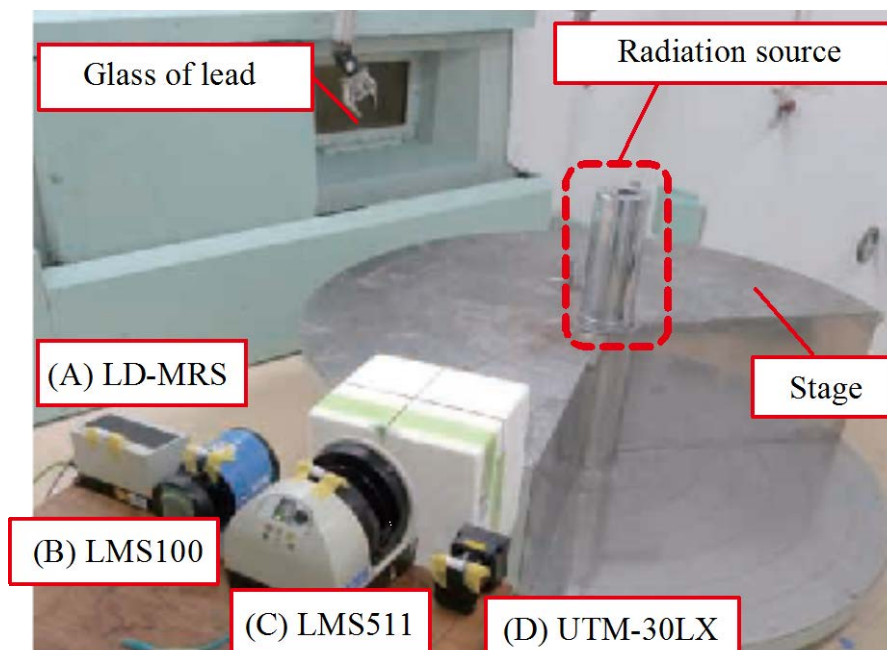



Fig. 4-8：Device position and configuration for gamma-ray irradiation test of 20 [Gy/h]

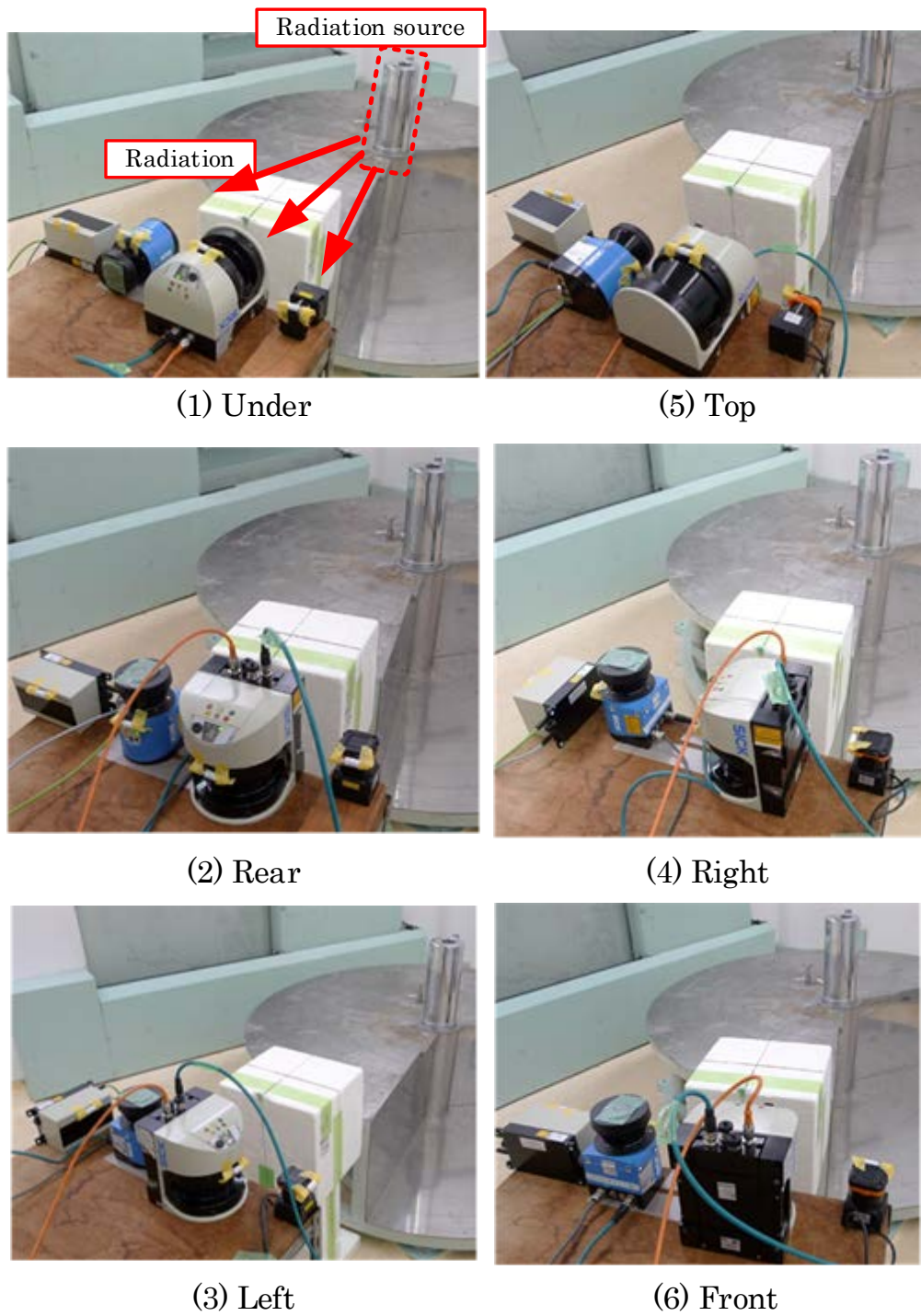



Fig. 4-9 : Charge of orientation of LRS

4.3.2 評価方法

Fig. 4-10に測定不能となるまでの，各センサのノイズ率を示す．グラフは横軸に計算上の積算線量，縦軸に時間当たりのノイズ率を示してある．ノイズ率は，ガンマ線を照射していない状態の出力データを正常な基準値として，ガンマ線を照射中に，各センサの誤差を超える出力をノイズとした．以下に，ノイズ率を算出するための手順を示す．

(1) 基準となる放射線の照射前の正常値を元に「背景データ」を作成．
背景データは以下のような処理を実施し，残ったステップの外れ値の平均値とした．
① 照射前の50スキャン分のデータを取得
② センサから一定距離以下のステップのデータや，他のセンサの影響を受けるデータは除外
③ スキャンの開始と終了の50ステップ分のデータを除外
（ただしLD-MRSは，ステップ数が170のため除外）
④ 外れ値の除外平均値（③のステップデータの最大・最小の30%分のデータを除外して求めた平均値）を導出．その平均値から各センサのカタログに示された誤差（3σ）以上の誤差を含むステップのデータを除外
⑤ 以上の処理を行って，残ったステップの外れ値の平均値を背景データとして使用

(2) 評価指標を定義
① ノイズの定義
- 統計誤差（σ）の3倍より大きい誤差をノイズとして定義
- 各ステップで，(1)から算出した背景データと，ノイズを比較して，ノイズの判定を行う

② ノイズ率の定義
- 背景データのステップ数で，1スキャンデータに入ったノイズ数を割ったものをノイズ率とする
- ノイズ率は，異なるセンサ間でノイズの入る割合を比較するために使用

4.3.3 評価結果

実験の結果得られた，各センサの測定不能時の計算上の積算線量の値，アミノグレイによる照射量の測定と，その際の吸収線量率をTable 4-6に示す．これにより，照射がほぼ予定通りに行われたことが確認できた．ただし，センサの設置位置を算出するための計算に誤りがあったために，実際の線量率の各値はTable 4-7に値となった．

各センサでノイズが確認できた代表的な出力結果を以下に示す. LMS511のノイズは，距離が大きくなる方向のノイズが見られ（Fig. 4-11 (B)），破損直前にはデータが発散し（Fig. 4-12 (C)），2%程度のノイズ率であった．LMS100のノイズは内側（距離がセンサに近い方向）に発生し（Fig. 4-12(B)），2%程度のノイズ率であった．LD-MRSのノイズは距離が大きくなる方向のノイズがほとんどであり（Fig. 4-12(B)），吸収線量率が76.4 [Gy/h]の場合には10%程度のノイズ率であったのに対し，測定不能の直前までは20%以下のノイズ率であった（Fig. 4-10 (c)）．そして，UTM-30LXのノイズは，吸収線量率が76.4 [Gy/h]以下の場合には距離が小さくなる方向のノイズがほとんどであり，吸収線量が153.6 [Gy/h]以上では, 距離の長さによる誤差の傾向が一様でなくスキャンデータの出力結果が“伸縮”を繰り返す傾向がみられた（Fig. 4-14(B)）．また，積算線量が200 [Gy]付近から伸縮の幅が広がり，測定不能に近づくとセンサの出力値の一部が回転する現象（Fig. 4-14(C)）や，全ステップがエラーメッセージを出力するなどの現象（Fig. 4-14(D)）が見られた．吸収線量率が76.4 [Gy/h]以下の場合には最大で10%以下のノイズ率であるのに対し，153.6 [Gy/h]以上では測定不能の直前までは約30%のノイズ率であった（Fig. 4-10 (D)）.

今回実験を実施した4機種のLRSに対してガンマ線を照射している際には不完全なデータが出力されることがあったが，ガンマ線の非照射時には正常値に戻ることが確認された. この事実は, 永谷らによる実験結果でも確認されている[99].

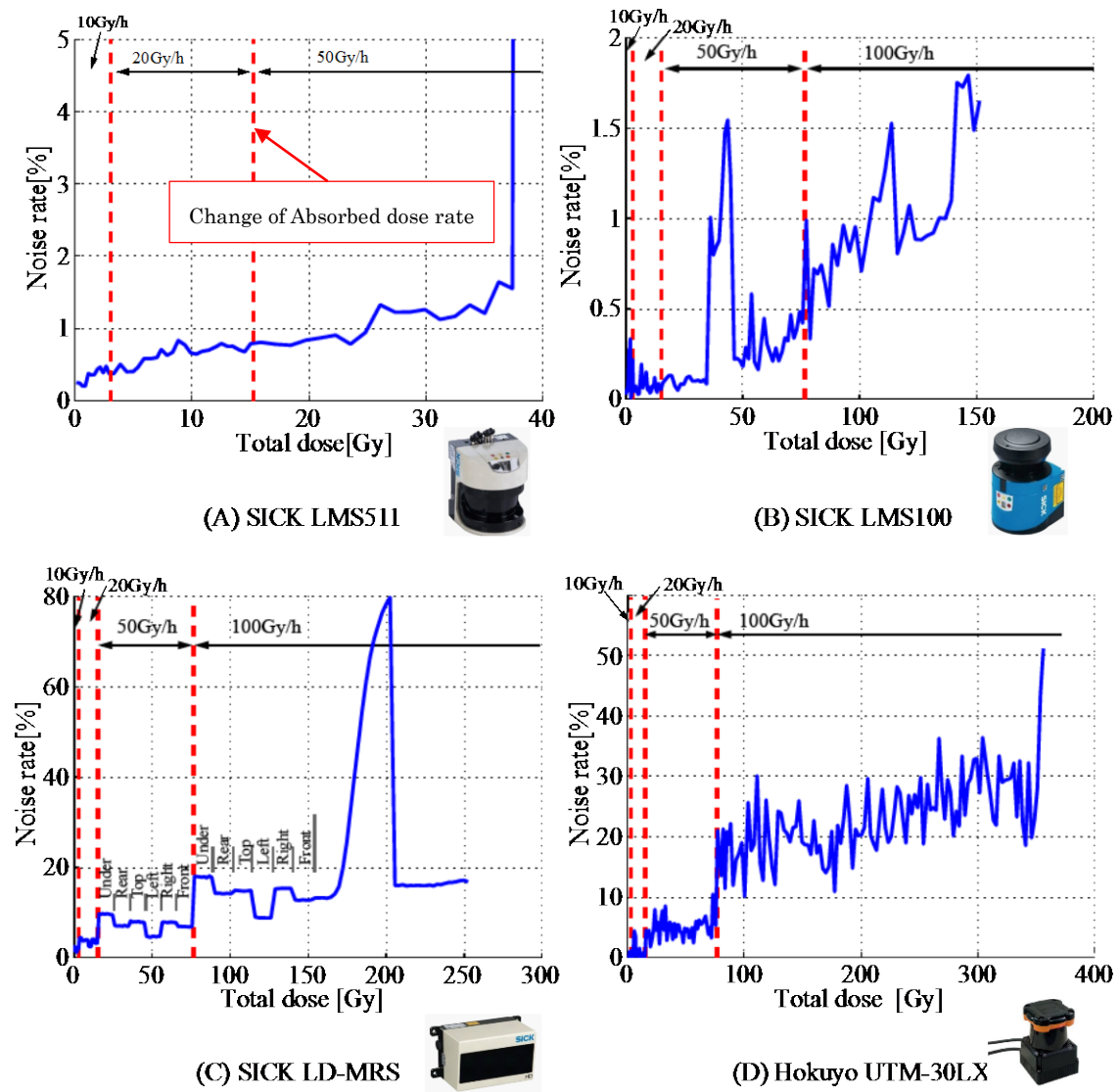



Fig. 4-10 : Experimental results of total dose and noise rate

Table 4-6: Total dose and absorbed dose rate of each LRS

No.	Maker / Mode	Total Dose		Broke After Absorbed Dose Rate [Gy/h]	Category
		Calculated Value [Gy]	Actual Measured Value		
1	SICK LMS511	38	41	76.4	Category2
2	SICK LMS100	153	144	153.6	Category3
3	SICK LD-MRS	256	182	153.6	Category3
4	Hokuyo UTM-30LX	358	291	153.6	Category3

Table 4-7: Planned and actual absorbed dose rate

Category	Total dose [Gy]	Absorbed dose rate	
		Plan [Gy/h]	Experimental condition [Gy/h]
Category1	10Gy	10	15.3
		20	30.5
Category2	100Gy	50	76.4
		100	153.6
Category3	500Gy	100	153.6
		200	298.3
Category4	1000Gy	200	298.3

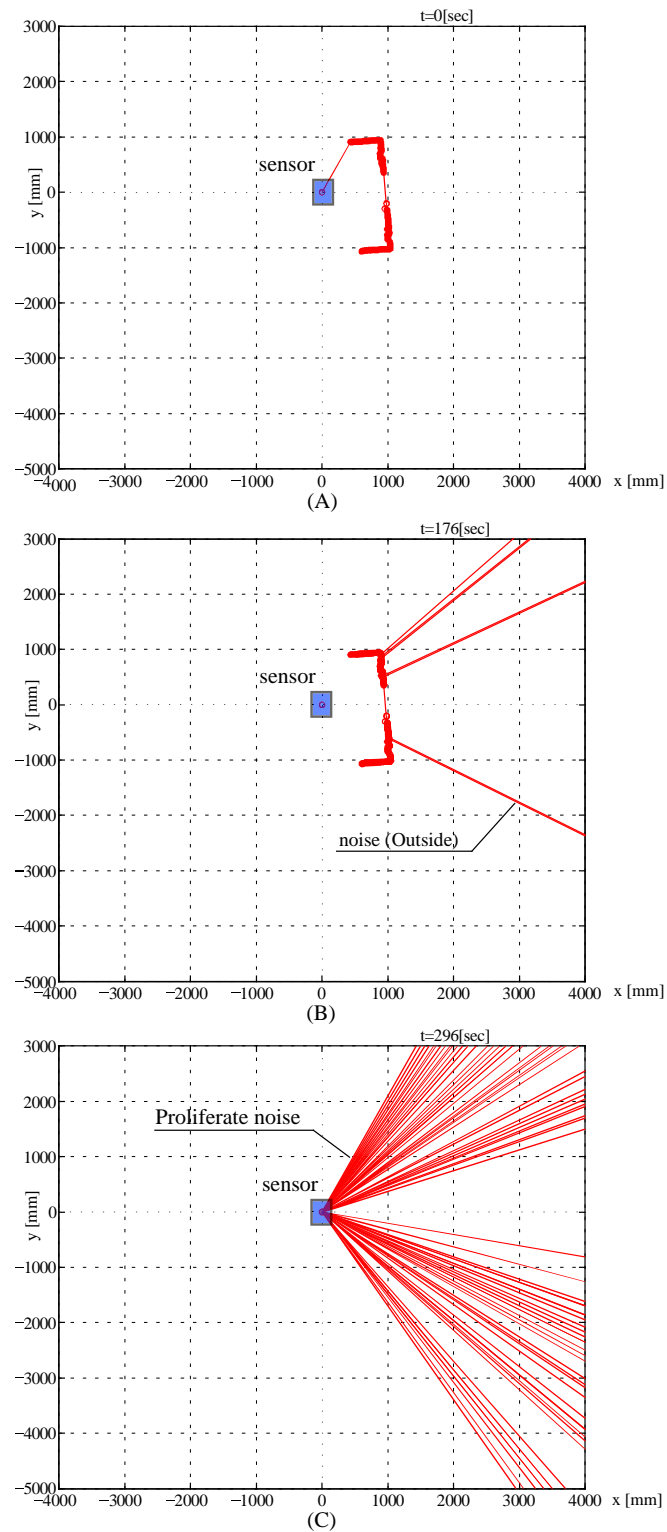



Fig. 4-11 : Typical sensory data from SICK LMS511.
(A) background data, (B), (C) scanned data during irradiation observed

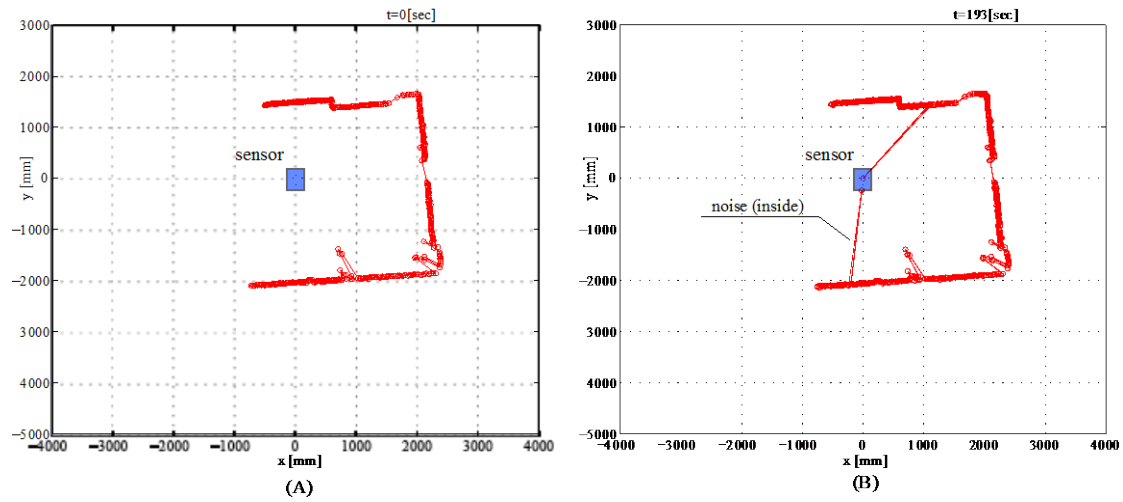



Fig. 4-12: Typical sensory data from SICK LMS100
(A) background data, (B) scanned data during irradiation.

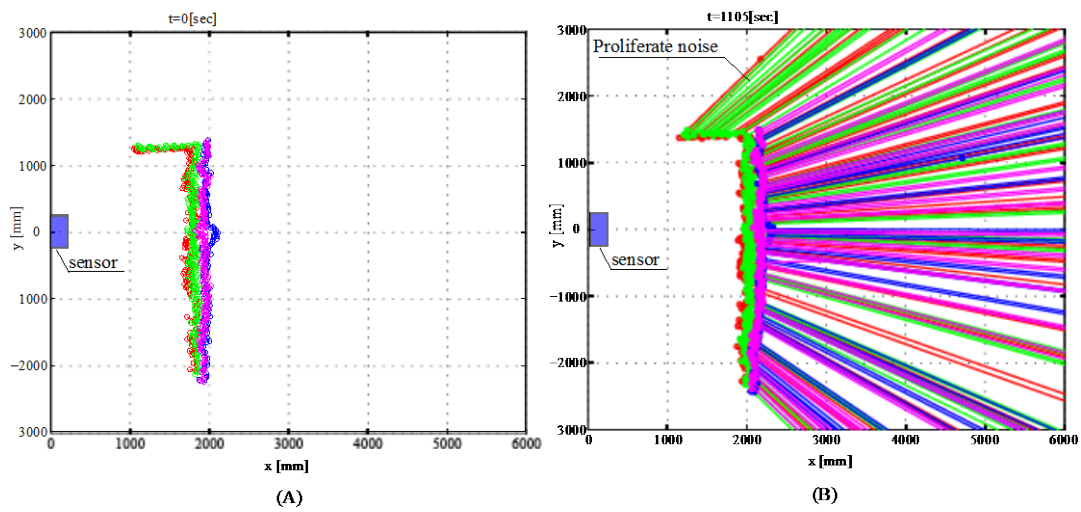



Fig. 4-13: Typical sensory data from SICK LD-MRS
(A) background data, (B) scanned the data during irradiation.
(Red, Green, Blue, Purple lines are four layers)

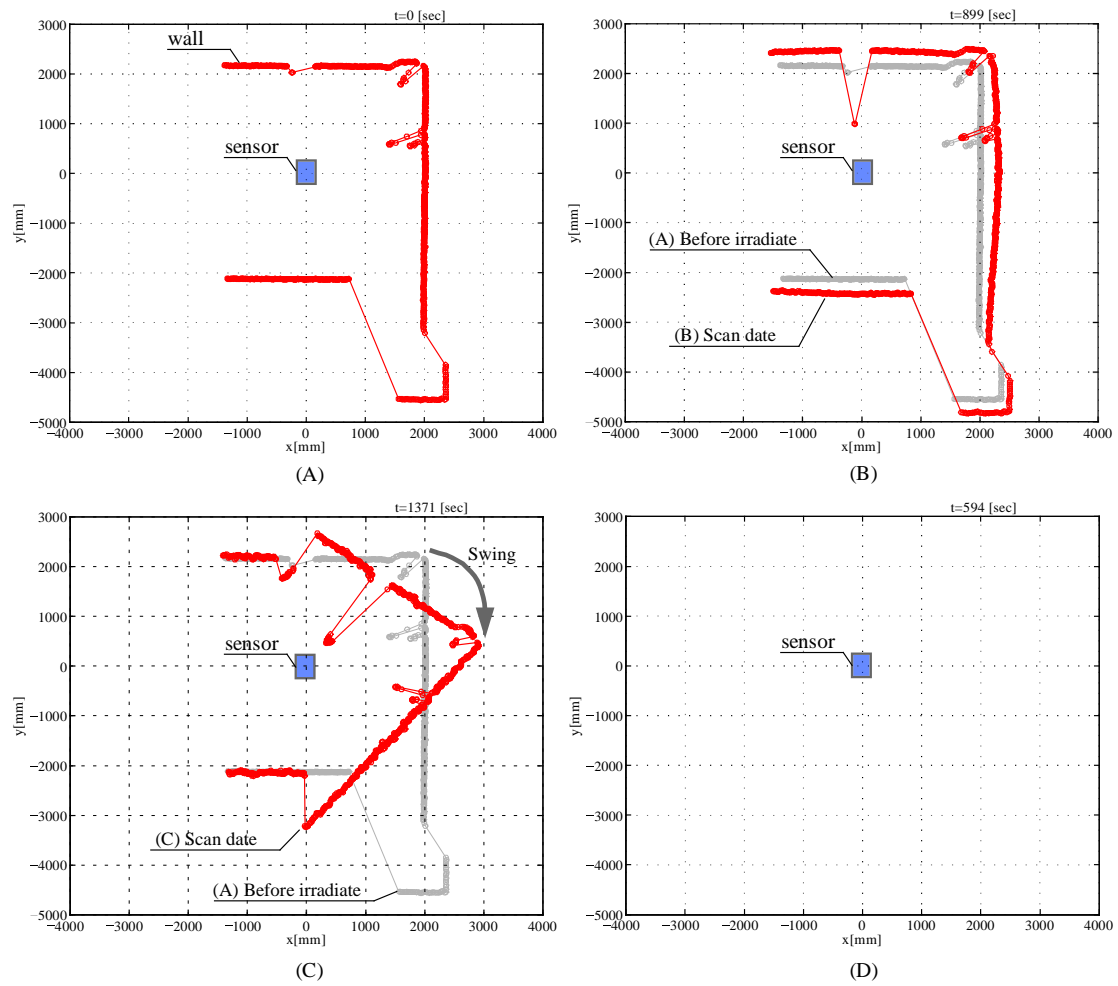



Fig. 4-14 : Typical sensory data from UTM-30LX, (A) background data, (B)-(D) scanned the data during irradiation

4.3.4 実験結果からの考察

今回の実験では各機種を1台のみで実験を実施したため，各機種のすべての個体において再現性が保証されない．しかし，今回の実験結果が先行研究とある程度，同じような傾向が示されていることから，本実験結果はある程度妥当であると考えられる．そして，今回の実験により以下の結果が得られた．

まず，センサの向きによる影響はSICK LD-MRS以外では顕著な違いは確認できなかった．この機種ではセンサの下部を線源に向けた際にノイズ率が増加し，左側の面を線源に向けた際にノイズ率が減少していることから（Fig. 4-10 (c)の50[Gy/h]と100[Gy/h]のUnderとTop，LearとRightのそれぞれ差異より），下部の右側に放射線に影響されやすいデバイスがあることが推測することができる．

次に，誤差の計測距離が大きくなる傾向，あるいは小さくなる傾向をもつなど機種により特徴が見られた．安全の確保を目的にLRSを用いる場合，距離が小さい側への誤差であれば保守的な結果であるが，距離が大きい側に誤差が発生する場合には安全センサとしては信頼性が下がる可能性がある．

最後に，UTM-30LXの100[Gy/h]以上の線量で確認できた出力結果の伸縮や回転現象は，自律移動機能を目的とした利用の場合には，地図作成や障害物回避などの際に障害になることが予想される．高線量率下で使用する場合には何らかの対策が必要となる．

今回の実験では，全てのセンサが停止したために，各センサは実験後に，開発メーカーで検証を頂き，メモリの不良や，レーザーなどの光学系の部品の劣化などが確認された．主な症状と，症状から考察と対策案について以下に示す．

1. 症状：
   複数の機種で，再起動でも動作せず，EPROM部のデータの欠損と思われる故障があり，メモリ内のデータを書き換えることにより，正常動作が確認された．
   考察：
   再起動でも動作しない機種では，ソフトエラーによる動作不良ではなく，ハードエラーによる動作不良であったと考えられる．メモリの書き換えにより正常に動作したので，シングルイベント効果または，トータルドーズ効果により，半導体チップであるEPROMが徐々に劣化していく，電離効果によるハードエラーによる動作不良であったと考えられる．
   対策案：
   本質的には，半導体の製造プロセスから対策が必要であるが，コスト的に困難であるために，宇宙機器で用いられている回路設計時に，回路を多重

化させる耐放射線対策設計（RHBD：Radiation Hardness By Design）が必要である．しかし，既存の製品（COTS）では，大幅な設計変更が必要であり，コスト面や製品サイズ，動作スピード，消費電力などに影響を与えるため，困難である．このため，EPROMなどの半導体デバイスの周囲に鉛などの重金属で，簡易的に覆うなどの対策が有効と考えられる．

2. 症状：
光学系の受光素子部品の劣化が確認されるが，出荷可能品質の許容内であった．
考察：
受光素子の破損であることから，はじき出し損傷効果による影響と考えられる．
対策案：
光学系の受光素子部品は，放射線に対して暴露する必要がある場合が多い．このため，放射線の照射方向を減らす目的に，Fig. 4-15のようなフードを追加することで，放射線の放射量を減らすことが期待できると思われる．Fig. 4-15は，LRSを屋外に設置した際に，センサに対して直射日光が入ることを防ぐための，屋外用の日除け板である．

3. 症状：
レーザーモジュールの破損があり，モジュールの交換により正常動作を確認した．
考察：
モジュールの破損部位が不明であるが，ハードエラーであり，トータルドーズ効果かはじき出し損傷効果によると考えられる．また，対策案は第2項目目の症状の場合と同様な対策が有効であると考えられる．

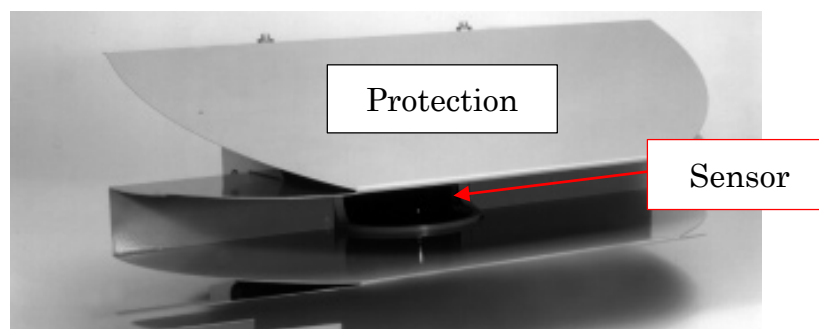



Fig. 4-15：Sunshade and Weather protection [117]

なお，測定結果の精度を向上させるためには，センサの台数を増やして実験を実施する必要がある．さらに，原子力災害などで想定される線量率の調査が不足したため，今回は過大とも思える線量率での実験を実施した．今後は想定される線量率を明確にするための調査・検討と，適切なカテゴリ分けについて詳細な検討を行う必要がある．

また，民生品機器の開発メーカーにとって，放射線耐性を備えた特殊仕様の機器の開発は，メーカー単独では負担であり，専用機器の開発はロボットの設計開発の選択肢を狭めることになる．そこで，既存の製品を活用した放射線耐性を向上させる手法が必要となる．さらに，電子部品が仕様上で放射線耐性を有することをメーカーが証明すると，輸出の際に手続きが煩雑になる可能性があり，すでに流通する民生品に影響を与える可能性もある．今後はこれらを考慮した，移動ロボット向けの設計も考慮した，光学系センサ類の放射線遮蔽方法について検討を行っていく必要がある．

実験手法について，センサの固定の不良という課題が有った．Fig. 4-10にある，(b) SICK LMS100の積算線量30～45[Gy]付近でノイズ率が約1.5%まで上昇している箇所と，(c) SICK LD-MRSの積算線量170～210[Gy]付近でノイズ率が80%まで上昇している箇所は，検証の結果どちらもセンサの固定が不十分である可能性があった．今回実験に使用したLRSは，計測用のレーザーをモータで回転させている．このモータの回転により，センサ全体が微小な振動をしていた．Fig. 4-16に示した，2つのセンサの設置事例では，積み重ねた木の板や，紙管の上など不安定な場所にセンサを設置したために，センサ本体の微小な揺れにより，センサが徐々に移動したと考えられる．LMS100の場合では（Fig. 4-16 (A)），配置の関係からセンサを置く台に，揺れやすい木片を使用したため，振動がノイズ率に影響を与えたと考えられる．さらに，LD-MRSでは（Fig. 4-16 (B)），ノイズ率は緩やかに上昇しており，開始時と終了時の背景データが若干回転していたことから，固定が不十分であったことが原因の一つと考えられる．追加の実験では適切な対策を講じる必要がある．

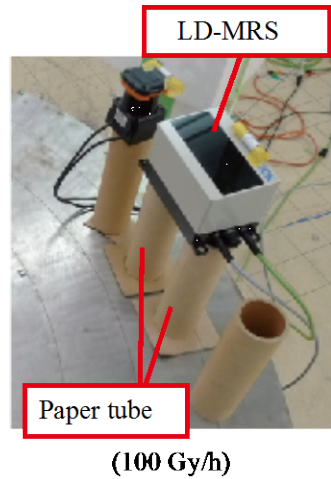
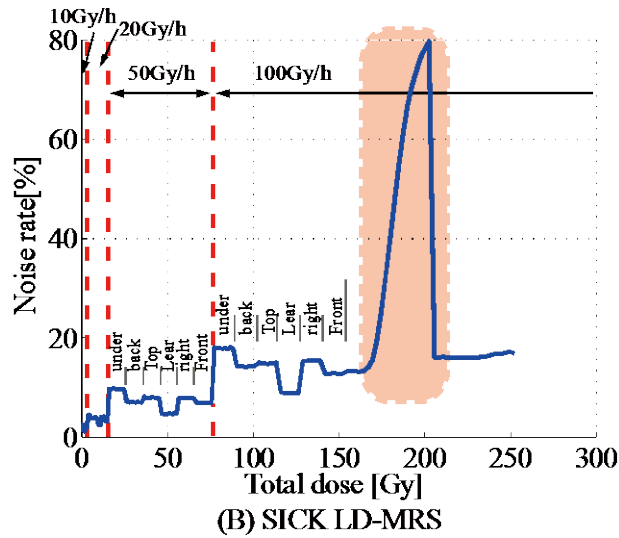
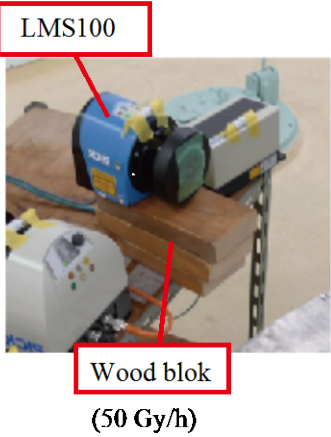
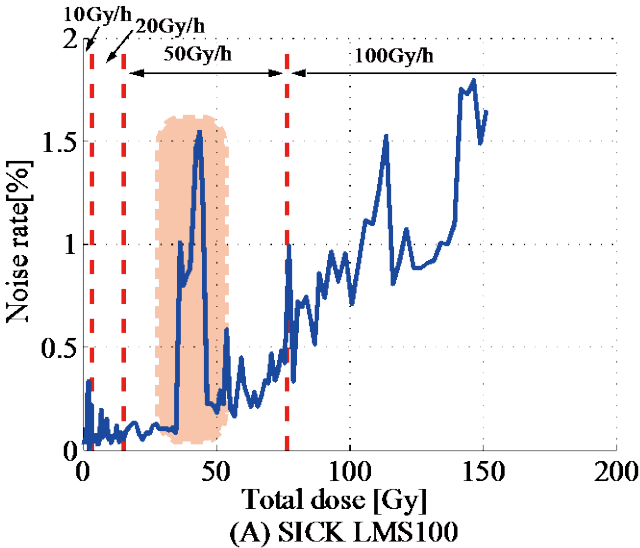



Fig. 4-16 : Experimental setting of the sensors

4.3.5 今後の課題と提案

本実験により，耐放射線性能を有する電子部品の評価の困難さと，評価に多大なコストが掛かることが確認できた．災害対応ロボットの市場だけでは市場規模が小さく，耐放射線性能を有する電子部品の開発と製品化には限界がある．このため，Fig. 4-5に示すようなCOTS製品の利用を前提とした，評価と共に評価法の標準化の検討が必要である．

また，市場規模については，放射線耐性を必要とする，宇宙機器産業，航空産業，防衛装備品産業，原子力機器産業など，業界を横断した情報共有が望ましい．それぞれの日本国内の業界の特徴を示した表をTable 4-8に示す．各分野では，一定の市場規模もあるため，放射線耐性を有する専用部品の開発や，開発企業と大学・研究機関との共同研究も盛んに行われている．それぞれの業界により，求める製品仕様に若干の違いはあるが，評価法の標準化や，評価情報の共有により開発費の削減が期待できる．

また，放射線耐性能を有する電子部品の開発が先行している宇宙機器産業においては，他の業界と共通することで，部品の生産数量の増加となり部品単価の低下も期待できる．しかし，業界を横断した設計の効率化やコスト削減を目的とした，ガイドラインや標準化の取り組みは確認出来ていない．短期的な成果は見えづらいが，福島第一原子力発電所の廃炉作業には，長期的な取り組みが必要であり，業界横断での取り組みにより，それぞれの業界の研究開発や実用化が加速し，この成果が今後の災害対応ロボットの実用化の加速に寄与するものと考える．

Table 4-8 : The necessary policy for the development of disaster response device radiation resistance

Industrial field	Space equipment	Aircraft equipment	Defense equipment	Nuclear power	Disaster response robots
Evaluation method	established	established	established	established (Manufacturer of know-how)	non-established
Cooperation with research institutes	many	many	few	many	many
Customized development of electronic components	dedicated platform	dedicated platform	dedicated platform	dedicated platform	ready-made
Production volume	few	abound	abound	few	?
Component piece rate	sizable high	high	high	sizable high	?
Market size (in Japanese)	approximately 0.26 trillion yen	approximately 1.4 trillion yen	approximately 2 trillion yen	approximately 260 trillion yen (global market)	?

4.4. まとめ

本研究では，災害対応ロボットの実用化に必要な考慮すべき開発情報のうち，放射線耐性を有する部品選定の情報共有不足による開発の非効率性に焦点をあて，これを解決する方策について提案した．移動ロボットの自律移動機能や安全用センサとして使用されている光学系センサに焦点をあて，LRSにガンマ線を照射する，放射線照射実験を実施した．

コバルト60ガンマ線照射装置を用いて，合計4機種に，あらかじめ定めたガンマ線を照射することで，各センサが測定不能値と破損特性を確認した．その結果吸収線量率が約150[Gy/h]で積算線量が最大で300[Gy]前後までセンサが動作することが確認できた．さらに，吸収線量率によるノイズ率の変化や，センサの向きによるノイズ率の変化が確認できた．また，耐放射線性能を有するCOTS製品の情報を流通させ，放射線耐性の向上のためのノウハウを共有することが，災害対応ロボットの実用化が促進していくために必要があると考える．

第5章
結論

5.1. まとめ

本研究では，災害対応ロボットの迅速な実用化のために，実用化を見越した研究段階から考慮すべき課題について検討し，それぞれの課題の解決策を提案した．災害対応ロボットの研究成果実用化をすることでボトルネックとして，実環境での実証実験中の安全性確保の困難さ，信頼性を低下させることなく短期間でロボットの仕様変更や改良を実施する困難さ，実運用に耐えうるセンサの選定の困難さを挙げ，これらを解決する方策について述べた．

第 2 章では，災害対応ロボットの実証実験における安全性確保の課題について，開発する災害対応ロボットなどの移動ロボットを実用化する際に必要な，実証実験における安全管理（リスクマネジメント）の方策を提案した．災害対応ロボットを製品化する際には，法律や認証等の面でも，安全への考慮は必須となる．同様に，研究開発中の災害対応ロボットといえども公共空間などの実環境で実証実験を行うためには，安全への考慮は必須である．しかし，研究開発中の災害対応ロボットに対して製品並みの安全性を求めることは困難であり，安全性以外の要素技術の研究開発を遅らせることにもなる．また，安全のための方策も暗黙知的な経験則に基づいて行われやすい．このため，暗黙知的に実施されることが多い，公共空間などの実環境での実証実験について，安全に関する国際標準規格に基づくリスクアセスメントと，リスクマネジメントの視点から課題と解決策を整理・明確化した．実証実験において研究者が実施しやすいリスクアセスメント手法とリスクマネジメント体制例を示し，安全の説明責任と責任体制を明らかにした．そして，提案した枠組みを元に，つくばチャレンジの事例に当てはめて，具体的な事例で検証した．

第 3 章では，災害対応ロボットの研究フェーズから実用化への隔たりの問題について述べ，効率の良い開発方法について考察した．効率的な研究開発を実現するために，ハードウェアやソフトウェアをモジュール化した，研究開発用の災害対応ロボットプラットフォーム「MATOI」を構築した，開発手法の実用性について検証した．MATOI の開発においては，RT ミドルウェアを用いることで各機能のソフトウェア部品（モジュール）を統合化し全体システムを構築した．モジュール化の考え方を適用することで，再利用性を考慮した災害対応ロボッ

トの開発が可能となった．さらに，開発するプラットフォームでは，災害時でも情報取集を可能とする環境モニタリング機能を搭載し，原子力発電所での実証実験を実施した．本開発では，RT ミドルウェアの活用と，他者が開発したモジュールを再利用することで，約半年ほどの開発期間でシステムを構築することができた，また，原子力発電所施設内での実証実験を通じて，MATOI の実用性も検証できた．さらに，他の研究用災害対応ロボット「FUMA」や「BlackShip」と開発効率を比較し，開発手法の有効性を検証した．

第4章では，災害対応ロボットの実用化において考慮すべき，放射線耐性を有する部品選定の情報共有不足による開発の非効率性の問題について述べ，その解決策を提案した．災害対応ロボットの外界センサの実用性について考察するため，災害対応ロボットの自律移動などに用いられるセンサモジュールの耐放射線試験を実施し，耐放射線性能を検証した．災害対応ロボットには，走破性能だけでなく防塵・防水など耐環境性などいくつかの基本機能が必要となる．放射線災害への対応も求められており，ロボットの構成要素である電子デバイスは放射線への耐性が問題になる．しかし，移動ロボットで用いられるようなセンサ類の耐放射線性能を検討した先行事例は少なく，事業化の際に再度デバイスを一から選定することは迅速な開発の妨げになる．そこで，移動ロボットに多用されている4種類のレーザーレンジセンサに対して，コバルト60ガンマ線照射装置を用いて，あらかじめ計画した線量でガンマ線を照射することで，耐放射線性能実験を行った．各センサが測定不能となった場合の線量値と破損特性を確認し，吸収線量率が約150[Gy/h]で積算線量が最大で300[Gy]前後まで動作することが確認できた．さらに，吸収線量率によるノイズ率の変化や，センサに照射するガンマ線の方向によるノイズ率の変化が確認できた．また，放射線耐性を有する部品選定の情報共有不足に対する今後の方策について提案した．

5.2. 課題と今後の展望

特に具体的なニーズが高い災害対応ロボットにおいては，事業化を意識した課題の解決を行う必要がある．事業化のためにも，次のような課題が残る．

第2.6節で示したリスクアセスメントでは，リスクの評価法に「加算法」を用いたが，今後は移動ロボットや，公共空間を用いた実証実験に最適な評価法などの検証が必要である．また，今回は設計手法については言及していないが，模索的な段階の実証実験で，設計者側で事前に行う必要がある保護方策をまとめるなどの課題がある．なお，2009年～2014年にNEDOらが実施した「生活支援プロジェクト」 [53]では，設計者向けにロボット介護機器の安全設計のための，リスクアセスメントシートの開発も行われている [118]．ここでは，移乗介助（装

着型，非装着型)，移動支援型，排泄支援型，見守り型向けに，加算法と積算法の「ハイブリッド法」の計算法が事例として示されている.「リスクアセスメント手法には王道はなく，採用する手法はアセスメント実施者の自由である（ひな形シートはあくまでも例)」とも紹介されており，ロボットの用途や現場に合わせて，各種ひな形の開発が引き続き必要である.

第2.7節では，「つくばチャレンジでは，大きな事故が起きていないことが一つの成果」と記した．しかし，現状のつくばチャレンジにおける実証実験において事故が発生した場合には，JIS Q17050-1:2005に示すような，説明が果たせない状態である点である．具体的には，「事故が起きないことを前提」としたマネジメントの事例も見受けられる．つくばチャレンジに限らず，リスクアセスメントやリスクマネジメントを注意深く実施したとしても，絶対安全が存在しないため，必ず事故は起きることを前提としなければならない．すでに医療の分野は，事故が起きることを前提としない状況があったが，原因でさらに別の感情的な問題が起きることが問題視され，事故が起きることを前提としたリスクコミュニケーションが実施されている [119].

第3.8節では，MATOIの開発が効率的であったと述べたが，同様な装置開発との比較検討ができていないため，効率化の妥当性が示せていない．理想としては，同規模の開発を同等の技術を持つ人員で開発し，比較検討を行う必要があるが，現実的は困難である．このため，同規模のシステムを継続して実作業として開発していくことで，有効性の検証すること必要となる．さらに，MATOIの開発は，東日本大震災への緊急対応の要素も強かったために，明確な仕様を定めての開発が実施しづらい状態でもあった．また，今回の実証実験では実際の発電所内で実施したが，実施の機会や時間の制約，施設内の建物の形状などを示したデータの安全管理対応など，実験に対する制約もあった．今後は，中長期的な視点での研究開発と検証の実施が必要である.

第4.2節では，Table 4-6のような各カテゴリと，積算線量・各吸収線量率を設定したが，災害対応ロボットが放射線の影響を受ける場合の数値設定と，この数値設置の妥当性の検証が必要である．これには，より現場からフィードバックが必要となり，特に福島第一原子力発電所の事故対応の現場とのすり合わせが必要となる．また，今回は，各デバイスに対して一台しか，実験を実施できなかった．これはコスト的な問題が大きな要因であったが，個体差を無くすためにも，一つのデバイスに対して複数台の個体を対象に実験をする必要があった.

今後の展望としては，次の通りである.

まず，災害対応ロボットを含めた，サービスロボットの事業化までの過程や事業化後に予期せぬ事故が起きる可能性は高い．これに対して，事故が起きること

を前提といたリスクコミュニケーションが必要である．サービスロボットは，事業化や産業化になることが期待されており，普及が進めば事故が起きる確率も高くなる．しかし，一般的な機械を始めて，日本では事故が起きることを前提とした保護方策の必要性の議論が広まったのは最近のことである．災害対応ロボットが，災害時に活用される場合には特に期待が大きい．しかし，過度な期待になる可能性も高く，さらに不幸にも事故が起きた場合のその後の事業化に，大きな影響を及ぼす可能性がある．事故が起きた後の対応に関するリスクマネジメントや，第二者にあたる利用者や第三者のメディアとの間のリスクコミュニケーションに関する議論を充実させていくことが今後必要である．

次に，第4章の実験では，放射線試験方法の見当をつけることも目的の一つであった．今回の実験の知見を元に，災害対応ロボットに用いられる電子部品の耐放射線性能の試験方法の標準化が必要である．人工衛星をはじめとした，宇宙機器の分野では試験方法の標準化も先行しており [106]，これらの知見を有効に活用し，今後長期化が予想されている福島第一原子力発電所の事故対応を円滑に進めるための装置開発に寄与することが次の目標である．なお，デバイス・装置メーカーが今回のような実験を実施するとなると，一回あたり数百万円～数千万円のコストが発生し，設備の予約などで数ヶ月前からの準備が必要となる．このことからも，宇宙分野と災害対応ロボット分野での部品の共通化などの検討は，双方にとって，有効であると考えられる．

本研究では，事業化を見据えた実用化の課題を整理・明確化し，その解決策を検討してきたが，事業化の際にはさらに多くの問題が発生する．現実的には，事業化を実施した際にはじめて判明した課題を，実用化の課題設定にフィードバックする必要があるが，本研究ではまだその段階に至っていない．今後は災害対応ロボットの事業化を具体的に実施することで，事業化における課題を明らかにし，実用化で考慮すべき課題を明らかにする必要がある．これにより，仮に大きな災害が発生した場合においても，災害対応ロボットが迅速に開発できる環境が構築できると考える．

付録A

愛知万博におけるリスクマネジメント体制

安全管理にも重点的に実施したもの実証実験の一つの事例に，愛知万博（2005年日本国際博覧会）がある．ここでは経済産業者・NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）らが中心となり，サービスロボットの実証実験について取り組んだもので，リスクアセスメントに関する対策であった [54] [65]．愛知万博における，リスクマネジメント体制の分析を示した結果をFig.a-1に示す．

愛知万博では，すべてのロボット（個別の企業パビリオン，展示館などは除く）は，愛知万博協会から指定された，ロボットの安全の「鑑定」を実施する委員会が組織された．Fig.a-1に示すとおり，鑑定を実施する委員会は，規格に基づいた「認証」ではなく，あくまでもロボットを開発した研究者や企業などの第一者によって作成されたリスクアセスメントの結果を，第三者の立場から妥当性を鑑定する体制であった．この体制が可能だったのは，実験環境が固定されているため，機械類の制限の決定が容易だった点が特徴に挙げられる．

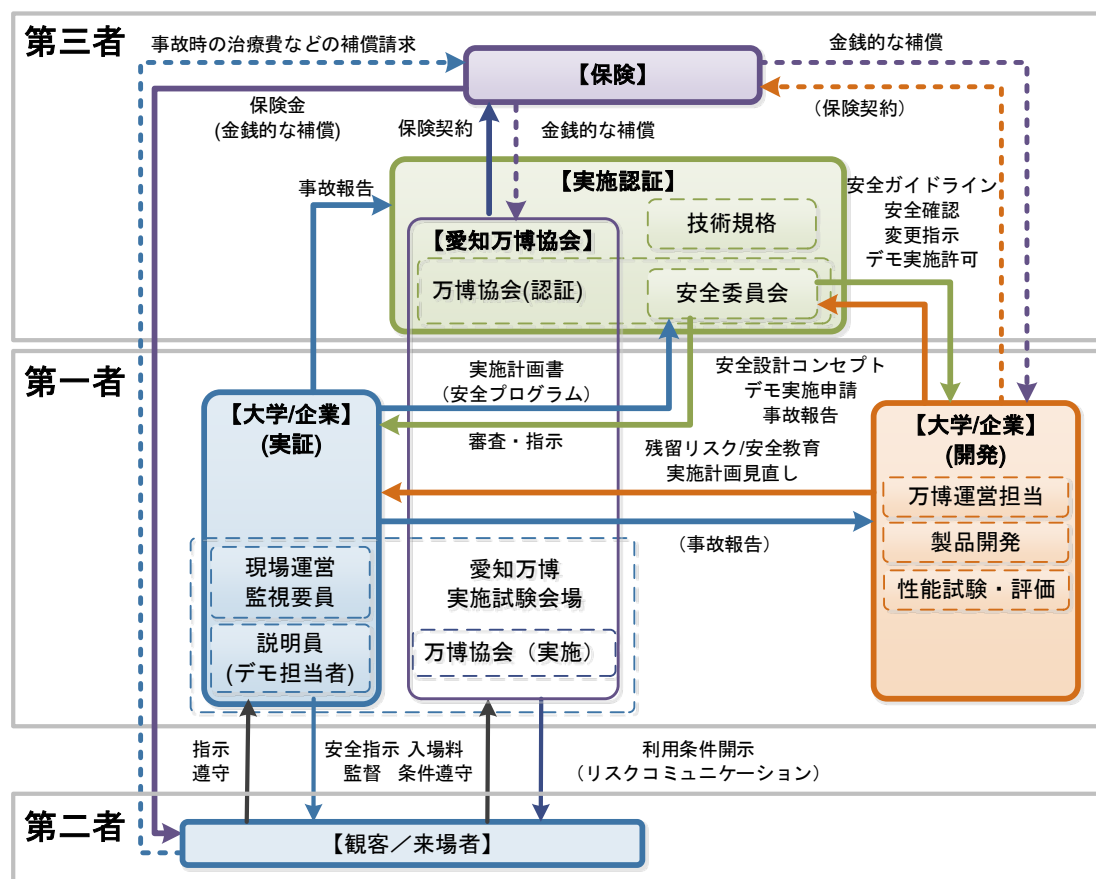



Fig.a-1：Analysis of the Aichi Expo in structure risk management.

付録B

用語の定義・説明

サービスロボット：
主に生活環境で稼動するロボット（JIS B0187:2005）

災害対応ロボット：
自然災害や産業災害時に，無人化施工機械を含む陸上移動調査・作業ロボット，水中移動調査・作業ロボット，無人飛行ロボットなどにより，人が行うことが困難，危険，あるいは不可能な作業，情報収集，調査，工事を実施するロボット

生活支援ロボット：
従来の工場などで隔離の原則の元で動作する産業用のロボットと違い，人の生活と同じ空間で，福祉，清掃など様々な用途に使用されるロボットの総称

研究（Research）（基礎研究）：
世の中にないシーズの創出，各種基礎技術の基盤技術化

実用化（Practical use）（開発，製品開発，試作，応用研究）：
マーケティングによって製品仕様を絞った製品開発，研究から開発マインドと転換フェーズ

事業化（Commercialization）（製品化，商品化，商品開発，試作量産，ビジネススタートアップ，製品化研究）：
製品が売れて事業が成り立つ，製品開発の市場投入し，マーケティングからセールスに製品を商品にするフェーズ

産業化（Industrialization）（本格的商業化，工業生産）：
研究成果が社会を動かすほどの継続的な商品の導入・量産のフェーズ

イノベーション（Innovation）：
新製品を市場へ導入し成功させることに限らず，「イノベーションとは社会技術システムの変革であり，そのシステムは製造，流通，原価，性能，および顧客ニーズへの適合などの改善を含むものである」（S.J.Kline [39]）

実験（Experiment）：
研究者や技術者が研究や開発した技術の成果を確認できる限定的な場所において，研究・開発した成果や技術を確認すること作業・活動とすること

実証実験（Demonstration experiment）：
研究者や技術者，システムインテグレーターらが開発した技術の有効性を確認できる場所において，研究・開発した技術の有効性を確認・証明すること

社会実験（Pilot program）（社会実証）：
サービスインテグレーターや事業者などが，開発した技術を導入する公共的に相当する場所で，開発した技術を社会が受容，適合するかの確認すること

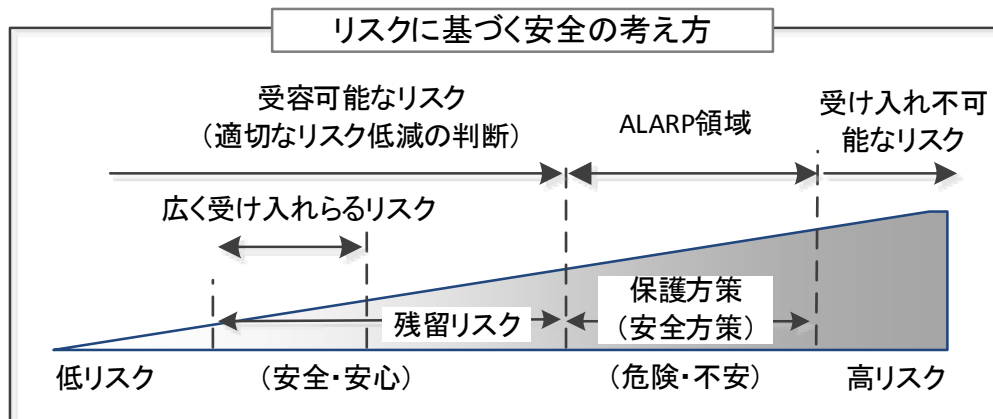
社会実装（Societal implementation）：
事業者や行政などが，開発した技術を導入する公共的な場所で，社会に導入・適応させる取り組みで，新規のサービスをプロトタイプすること

安全（Safety）：
受容できないリスクがないこと（ISO/IEC Guide 51:1999 / JIS Z8051:2004）

リスク（Risk）：
危害の発生確率と危害のひどさの組合せ（ISO12100-1:2003/JIS B9700-1:2004）

安全の原則：
一般的に「リスク」と「利益」のバランスが「State of the art（最先端の技術）」に基づいている事を認めている

許容可能なリスク（Tolerable risk）：
社会における現時点での評価に基づいた状況下で受け入れられるリスク．(ISO/IEC Guide 51:1999 / JIS Z8051:2004)

ALARP領域（As Low As Reasonably Practicable）：
リスク軽減をさらに行うことが不可能である場合のみ，もしくはさらに行うリスク軽減のための費用が，得られる改善と釣り合いである場合のみ，許容可能な領域

安全の判断：
“ALARP”の原則に基づき，合理的な代替設計（RAD）が無いことを証明し，残留リスクに対しては，十分にリスクが小さい（Critical Hazard）ことの証明により判断［120］

RAD（Reasonably Alternative Design）：
合理的な代替設計基準．洗練された合理的な代替設計が無いこの確認

保護方策（Protective measure）：
リスク低減を達成することを意図した方策（ISO14121-1:2007 3.9，ISO12100-1:2003 / JIS B9700-1:2004）．「設計者」による3ステップメソッドなどによる保護方策と，「使用者」による，組織や，追加安全防護物の準備及び使用，保護具の使用，訓練などにより低減されるもの．

3ステップメソッド（3 step method）：
設計者によって講じられる保護方策であり，次の三つのステップによってリスクを低減させる手法（JIS B9700-1：2004，ISO 12100-1：2003）．

(1) 本質的安全設計方策
(2) 安全防護・付加保護方策
(3) 使用上の情報

規格（Standard）：
与えられた状況において最適な秩序を達成することを目的に，共通的に繰り返して使用するために，活動又はその結果に関する規則，指針又は特性を規定する文書であって，合意によって確立し，一般に認められている団体によって承認さ

れているもの（JIS Z0002 :2006，ISO/IEC Guide 2: 2004）

標準化（Standardization）：
実在の問題又は起こる可能性がある問題に関して，与えられた状況において最適な秩序を得ることを目的として，共通に，かつ，繰り返して使用するための記述事項を確立する活動．（JIS Z0002 :2006，ISO/IEC Guide 2: 2004）

リスクマネジメント（Risk management）：
リスクについて，組織を指揮統制するための調整された活動．（JIS Q0073 :2010, ISO Guide 73 :2009）

リスクアセスメント（Risk assessment）：
リスク分析及びリスクの評価からなるすべてのプロセス．リスクマネジメントの一部（JIS Z8051:2004，ISO/IEC Guide 51:1999）

リスクコミュニケーション（Risk communication）：
リスクの発見及びリスク特定のための情報収集し，行政，専門家，企業，市民などのステークホルダーである関係主体間し，相互に意思疎通を図り，関係者に及ぼす可能性のある被害の回避又は低減．合意形成のひとつ．
（JIS Q31000：2010，ISO 31000：2009）

放射能と放射線：
原子核は安定で変化しないが，中には不安定なために放射線を出して別の原子核に変わってしまうものがある．原子核の変化（崩壊）にともなって放射線を出す物質のことを放射性物質放射線を出す性質を放射能とよぶ．原子核の変化のしかたによって，ガンマ線，ベータ線，アルファ線という3種類の放射線が放出される．

線量当量：
被曝をもたらす放射線の種類によって，生物に現れる被曝影響の大きさが違い，考慮した被ばく量単位「線量当量」であり，学術的論文等では伝統的にrad（ラド：rad）が使用されることが多いが，一般的にシーベルト(Sv)が用いられる．
1 [Sv] ＝ 100[rem]，1 [Gy] ≒ 1シーベルト[Sv]，100 [rad] =1 [Gy]

積算線量（Total dose）：
積算線量は放射線が電子機器に対して影響を与えた総量（Gy）
1kg あたりに吸収するエネルギー「吸収線量」(J/kg)
値が大きいほど放射線耐性があることになる．
1[Gy] = 1 [J/kg]

吸収線量率（Absorbed dese rate）：
吸収線量率は単位時間当たりの放射線によって，機器に吸収されるエネルギー量（Gy/h）を示す．1時間あたりの「吸収線量率」(Gy/h)

COTS（Commercial Off The Shelf）：
主に，宇宙産業や軍事産業において，既製品のソフトウェア製品やハードウェア製品，または一般向けにライセンス提供されるものを採用すること．

シングルイベント効果（SEE：Single Event Effect）：
1個の高エネルギー粒子（中性子，陽子，重イオンなど）の荷電粒子が半導体チップ内を通過したときに起こる，照射誘起過度電流による誤動作・損傷の現象で，一時的な誤動作（ソフトエラー：再起動やデータの書き換えで復旧）や，損傷（ハードエラー：素子を破損させる永久故障）を起こす．
ソフトエラーの代表的な現象は以下の2つ．
- シングル・イベント・ラッチアップ（SEL：Single Event Latch-up）：
  ロジック半導体で起こる代表的な現象がラッチアップと呼ばれるもの．
- シングル・イベント・アップセット（SEU：Single Event Up-set）：
  メモリ半導体で起こる代表的な現象がデータの反転がおこるもの．

[101] [100]

トータルドーズ効果（TID：Total Ionizing Dose）：
荷電粒子，あるいは電磁波を半導体チップが浴び続けることによる累積効果として半導体デバイスの電気的特性を劣化させる現象．シングルイベント効果に比べ，低エネルギーの放射線でも発生する現象．プロセッサやメモリなどのMOS型半導体デバイスに見られる症状で，次のような現象を発生させる．
- 不良症状は性能劣化で，最大動作周波数が低下
- トランジスタのリーク電流の増加
- トランジスタのしきい電圧の変化
- メモリのデータ保持期間が短くなる

[101] [100]

はじき損傷効果（DDD：Displacement Damage Dose）：
半導体チップ内に，電子線や陽子線（プロトン），中性子線などの粒子が突入し，半導体の原子核に衝突して玉突きのように原子核をはじき飛ばし，リーク電流の増加や，素子の特性劣化を引き起こす．半導体デバイス全体に影響を与える効果で，LEDなどの発光デバイス，太陽電池などの受受光デバイス，CCDなどのイメージセンサ，オペアンプなどのリニアICなどの特性が変化現象.

・不良症状としては性能劣化で，TID効果と類似している現象.
・TID効果が電荷による電気的な効果を意味しているのに対し，DDDは粒子線と半導体原子の物理的な衝突による作用を指す.
・プロセッサやメモリなどの半導体チップではDDDは起こりにくい現象.

[101] [100]

参照文献

[1] 富士キメラ総研, 2002コミュニケーションロボットの将来展望, 富士キメラ総研, 2002.

[2] ロボット政策研究会, “ロボット政策研究会 報告書～RT 革命が日本を飛躍させる～,” 経済産業省, 2006.

[3] ロボット産業政策研究会, “ロボット産業政策研究会 報告書,” 経済産業省, 2009.

[4] 国際レスキューシステム研究機構他, “戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト被災建造物内移動 RT システム（特殊環境用ロボット分野）閉鎖空間内高速走行探査群ロボット成果報告書,” 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2011.

[5] 産業競争力懇談会, “災害対応ロボットセンター設立構想- 2013年度プロジェクト 最終報告,” 産業競争力懇談会, 2014.

[6] 出川通, 技術経営の考え方 MOTと開発ベンチャーの現場から, 光文社, pp.13-37, 2004.

[7] B. M. Lewis, "National Innovation Systems and US Government Policy International Conference on Innovation in Energy Technologies," NIST, 30 9 2003. [Online]. Available: http://www.oecd.org/dataoecd/20/16/16454388.pdf. [Accessed 8 9 2014].

[8] 水川真 , 尾崎安男, “産業用ロボットにおけるネットワークインタフェースの標準化活動,” 東芝レビュー, vol.56, no.9, 2001.

[9] Masaharu Shimizu, Nobuyuki Kita, Toshihisa Saito, Eijiro Takeuchi, Yusuke, Nakajima, Naohito Takegawa, Hiroki Igarashi, Yasuo Hayashibara, Hideaki Yamato, Kengo Toda, Takayuki Furuta , Makoto Mizukawa, “The Joint Interface of RT Components for Mobile Robots: The Activity Report Inform the Mobile Robot Working Group of the NEDO Intelligent RT Software Project,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.22, No.6, PP.767-776, 2010 .

[10] Noriaki Ando, Takashi Suehiro, Kousei Kitagaki, Tetsuo Kotoku , Woo-Keun Yoon, “RT-Component Object Model in RT-Middleware-

Distributed Component Middleware for RT (Robot Technology)-,” Proc. of The 6th IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA2005), pp.457-462, 2005.

[11] 青木昌彦 , 安藤晴彦, モジュール化—新しい産業アーキテクチャの本質 (経済産業研究所・経済政策レビュー), 東洋経済新報社, 2002.

[12] ISO 13482:2014. Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots.

[13] 日本ロボット工業会, “愛知万博で実証運用するロボットの安全性のガイドラインに関する調査成果報告書, 平成16年度成果報告書,” 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2005.

[14] 日本ロボット工業会, “サービスロボットの安全性等国際標準化に関する調査研究成果報告書,” 日本ロボット工業会, 2009.

[15] 厚生労働省 老健局 振興課 , 経済産業省 製造産業局 産業機械課, “ロボット技術の介護利用における重点分野,” 平成24年11月策定, 平成26年2月改訂, 2014.

[16] 瀬川友史, “ロボットによる産業革命の実現に向けてーユーザー主導・システムインテグレーター主導のイノベーションをー,” 株式会社三菱総合研究所, 2014.

[17] 総務省 消防庁国民保護・防災部参事官付, “平成21年度救助資機材の高度化等検討会報告書～検知型ロボットについて～,” 総務省, 2009.

[18] 日本ロボット工業会, “平成21年度災害対応ロボットの安全基準策定に関する調査研究報告書,” 日本機械工業連合会, 2010.

[19] 日本ロボット工業会, “平成22年度災害対応ロボットの安全基準策定に関する調査研究報告書,” 日本機械工業連合会, 2011.

[20] 小柳栄次, “災害対応ロボットQuinceの実用化と課題,” 日本ロボット工業会 機関誌「ロボット」, pp.26-32, 2012.

[21] 国際レスキューシステム研究機構; 三菱総合研究所; 日本ロボット工業会, “平成24年度成果報告書 特殊環境用ロボット等の標準化・安全規格化と競争力の強化等に関する検討,” 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2013.

[22] JIS B0187:2005. サービスロボット−用語.

[23] 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “第6章, NEDOロボット白書2014,” 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2014.

[24] 日本経済団体連合会 防衛生産委員会, “防衛技術調査報告書 無人機システム（UnmannedSystem)の現状と動向,” 日本経済団体連合会, 2014.

[25] 田所論, “防災ロボットについて我が国が取り組むべき中長期的課題,” 日本ロボット学会誌, vol.32, no.2 pp.154-161, 2014.

[26] 中山準平 , 杉本雅彦, “原子力施設事故時の情報遠隔収集ロボット,” 神戸製鋼技術資料, vol.53, no.3, pp.89-91, 2003.

[27] 原子力安全技術センター, “防災モニタリングロボット,” 2011.

[28] R. R. Murphy, “Trial by fire [rescue robots],” Robotics and Automation Magazine, IEEE, vol.11, pp.50-61, 2004.

[29] Brian M. Yamauchi, "PackBot: a versatile platform for military robotics," Defense and Security. International Society for Optics and Photonics 2004, pp.228-237, 2004.

[30] QinetiQ Robots, [Online]. Available: https://www.qinetiq-na.com/products/unmanned-systems/talon/. [Accessed 5 12 2014].

[31] 淺間一, “災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システムの構築,” vol.32, no.1, pp.37-41, 2014.

[32] 産業競争力懇談会, “産業競争力懇談会 2014年度 プロジェクト 中間報告 災害対応ロボットの社会実装,” 産業競争力懇談会, 2014.

[33] 建設無人化施工協会 技術委員会, “雲仙普賢岳火山砂防事業における無人化施工の最新技術,” 日本建設機械施工協会, 2011年10 月号, no.740, pp.48-51, 2011.

[34] 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “NEDO-最先端災害対応ロボット技術の開発成果を公開,” [オンライン]. Available: http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100176.html. [アクセス日: 5 12 2014].

[35] 桜林美佐, 武器輸出だけでは防衛産業は守れない, 並木書房, 2013.

[36] 清谷信一, 防衛破綻—「ガラパゴス化」する自衛隊装備, 中公新書ラクレ, 2010.

[37] A. Jacoff, E. Messina, H. Huang, A. Virts, A. Downs , Richard Norcross, “Standard Test Methods For Response Robots,” ASTM International Committee on Homeland Se-curity Applications, 2011.

[38] S.J.Kline, "INNOVATION IS NOT A LINEAR," RESEARCH MANAGEMENT, vol.28, no.4, pp.36-45, 1985.

[39] S.J.クライン, イノベーション・スタイル―日米の社会技術システム変革の相違, 鴫原文七訳: アグネ承風社, pp.16-36, 1992.

[40] 只野文哉 , 島史朗, “研究・開発―日本企業における問題に挑戦する,” マネジメントセンター出版部, 1976.

[41] 植之原 道行, “戦略的技術経営のすすめ,” 日刊工業新聞社, 2004.

[42] 吉川弘之 , 内藤耕, 第2種基礎研究, 日経BP社, pp.10-43, 2003.

[43] 伊丹敬之 , 宮永博史, 技術を武器にする経営 日本企業に必要なMOTとは何か, 日本経済新聞出版社, pp.15-22, 2014.

[44] 齋藤冨士郎, 「研究」から「開発」へのモード変換フェーズとしての「応用特化研究」, 多摩大学研究紀要 10, pp.1-16, 2006.

[45] 藤田雅博, 景山浩二, 大槻正, 天貝佐登史 , 土井利忠, “エンターテインメントロボットAIBOの開発,” 日本ロボット学会, vol.21, no.1, pp.55-56, 2003.

[46] Intuitive Surgical, “Intuitive Surgical, Inc. - da Vinci Surgical System,” [オンライン]. Available: http://www.intuitivesurgical.com/. [アクセス日: 4 12 2014].

[47] DARPA , “DARPA Robotics Challenge,” [オンライン]. Available: http://www.theroboticschallenge.org/. [アクセス日: 5 12 2014].

[48] 消防庁, “平成21年度救助資機材の高度化等検討会報告書～検知型ロボットについて～,” 2009.

[49] National Institute of Standards and Technology, “Standard Test Methods For Response Robots, Mobility: Confined Area Obstacles: Stairs/Landings,” National Institute of Standards and Technology, 2011.

[50] 昆陽雅司, “つくばチャレンジ2009参加チーム一覧,” 計測と制御, vol.49, no.9, pp.645-651, 2010.

[51] 下笹洋一, 若林潔, 有木孝夫, 大町利夫, 末富大剛, 杉浦正則 , 小谷健太郎, “警備ロボット“ガードロボ”による警備サービス,” 日本ロボット学会誌, vol.24, no.3, pp.308-311, 2006.

[52] 村井亮介, 酒井龍雄, 上松弘幸, 中嶋久人, 三谷宏一 , 北野斉, “自律移動ロボット群による搬送システムの実用化,” 日本ロボット学会誌, vol.28, no.3, pp.311-318, 2010.

[53] 比留川博久, “NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクト,” 第28回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2010ACB2-1, 2010.

[54] 加部隆史, 木村哲也, 高森年 , 旭杉本, “サービスロボットの安全,” 日本機械学会誌C編, vol.75-754, pp.278-286, 2009.

[55] JIS B9700-1:2004. 機械類の安全性－設計のための基本概念 一般原則－第1部.

[56] 厚生労働省, “臨床研究に関する倫理指針 平成20年7月31日全部改正,” 厚生労働省, 2003.

[57] 山内繁, “支援機器臨床試験のための倫理審査申請の手引き－福祉用具臨床試験における研究倫理2008年度報告－,” 福祉用具臨床試験における研究倫理2008年度報告書, pp.33-44, 2009.

[58] 厚生労働省, “医薬品の臨床試験の実施の基準に関する省令の一部を改正する省令 厚生労働省令第24号(平成20年2月29日),” 2008.

[59] 医薬品医療機器総合機構, “臨床試験の一般指針,” 医薬品医療機器総合機構, 1998.

[60] 厚生労働省, “医療機器の臨床試験の実施の基準に関する省令,” 平成17年3月23日厚生労働省令第36号, 2005.

[61] 本間敬子, 山田陽滋, 松本治, 李秀雄 , 小野栄一, “介護支援ロボットの実証実験における倫理審査と被験者保護について,” 日本ロボット学会, vol.28, no.2, pp.49-58, 2010.

[62] 長谷部浩二, 河本浩明, 上林清孝, 松下明 , 山海嘉之, “段階的な臨床試験プロセスによる人支援型ロボット開発の提案,” 日本ロボット学会誌, vol.29, no.3, pp.236-240, 2011.

[63] 山田陽滋 , 本間敬子, “安全性を考慮した次世代ロボットの実証試験,” 日本ロボット学会誌, vol.29, no.3, pp.250-254, 2011.

[64] JIS Q31000:2010. リスクマネジメント–原則及び指針.

[65] 杉本旭, “愛・地球博で求めたロボットの“State of the Art“,” 日本ロボット学会誌, vol.24, no.2, pp.167-168, 2006.

[66] JIS B9702:2004. 機械類の安全性―リスクアセスメントの原則.

[67] 経済産業省, “次世代ロボット安全性確保ガイドライン,” 2007.

[68] 油田信一, 水川真 , 橋本秀紀, “つくばチャレンジのねらいと成果,” 計測と制御, vol.49, no.9, pp.572-578, 2010.

[69] 飯島純一 , 油田信一, “つくばチャレンジ実施における安全確保の努力,” 計測と制御, vol.49, no.9, pp.594-599, 2010.

[70] 野中郁次郎, 竹内弘高 , 梅本勝博, “知識創造企業,” 東洋経済新報

社, pp.81-141, 1996.

[71] 大塚実, “早大とテムザック，屋外の歩行が可能な人間搭乗型2足ロボット「WL-16RIII」,” マイナビニュース, 27 4 2006. [オンライン]. Available: http://news.mynavi.jp/photo/news/2006/04/27/320hl.jpg. [アクセス日: 5 12 2014].

[72] 桃田健史, “豊田市の超小型モビリティ実証実験に見る都市内交通革命の可能性とトヨタの本音,” ダイヤモンド社, 6 6 2011. [オンライン]. Available: http://diamond.jp/articles/-/12565. [アクセス日: 5 12 2014].

[73] ロボット特区実証実験推進協議会, “ロボット特区実証実験推進協議会,” つくば市国際戦略総合特区推進部科学技術振興課, [オンライン]. Available: http://council.rt-tsukuba.jp/. [アクセス日: 5 12 2014].

[74] 五十嵐広希, 木村哲也 , 松野文俊, “移動ロボットの屋外公共空間を用いた実証実験におけるリスクマネジメント手法,” 日本ロボット学会誌, vol.32, no.5, pp.473-480, 2014.

[75] 日本リスク研究学会 (編集), 増補改訂版 リスク学事典, 阪急コミュニケーションズ, pp.260-267, 2006.

[76] JIS Q1000:2005. 適合性評価−製品規格への自己適合宣言指針.

[77] JIS Q17050-1:2005. 適合性評価 供給者適合宣言 第1部：一般要求事項.

[78] 安全技術応用研究所 リスクアセスメント普及促進委員会, “リスクアセスメント技術の解説,” 安全技術応用研究所, 2004.

[79] 五十嵐広希, 木村哲也 , 松野文俊, “屋外自律移動ロボットの実証実験における安全対策について,” 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.1710-1713, 2010.

[80] Segway. Inc, “Segway - The leader in personal, green transportation,” [オンライン]. Available: http://www.segway.com/. [アクセス日: 5 12 2014].

[81] トヨタ自動車株式会社, “トヨタ - パーソナルモビリティ - Winglet,” [オンライン]. Available: http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/personal_mobility/winglet.html. [アクセス日: 5 12 2014].

[82] 齋藤剛, 池田博康 , 岡部康平, “生活支援ロボットのリスクアセスメントにおける保護方策実施後のリスク再見積に関する考察,” 日本ロ

ボット学会第30回記念学術講演会, RSJ2012AC3O2-3, 2012.

[83] 吉川肇子, “リスク・コミュニケーション,” 福村出版株式会社, 1999.

[84] E. Rohmer, T. Yoshida, K. Ohno, K. Nagatani, S. Tadokoro , E. Koyanagi, “Quince: A Collaborative Mobile Robotic Platform for Rescue Robots Research and Development,” Proc. of Int. Conf. on Advanced Mechatronics, pp. 225-230, 2010.

[85] 油田信一, “移動ロボットの研究のためのプラットフォーム,” 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.14-17, 1996.

[86] MobileRobots, Inc., “Intelligent Mobile Robotic Platforms for Research, Development, Rapid Prototyping,” [オンライン]. Available: http://www.mobilerobots.com. [アクセス日: 5 12 2014].

[87] 筑波大学 知能ロボット研究室, “研究テーマ - 筑波大学 知能ロボット研究室,” [オンライン]. Available: http://www.roboken.esys.tsukuba.ac.jp/theme/. [アクセス日: 5 12 2014].

[88] Willow Garage, Inc., “Willow Garage,” [オンライン]. Available: https://www.willowgarage.com/pages/pr2/overview. [アクセス日: 5 12 2014].

[89] セグウェイジャパン株式会社 , “走行ロボット開発支援プラットフォーム BlackShip,” [オンライン]. Available: http://www.segway-japan.co.jp/robot-hard/blackship.html. [アクセス日: 5 12 2014].

[90] OUSD Defense systems / land warfare and munitions, “FY2004 JOINT ROBOTICS MASTER PLAN,” United States Department of Defense, 2004.

[91] 前田弘文, 高森年, 大坪義一, 五百井清, 田所諭, 松野文俊, 金城隆也 , 五十嵐広希, “「自律と操縦に対応した移動ロボット用RTCの開発」第5報：RTK-GPSを用いた仮想軌道走行のためのRTC,” 第26回日本ロボット学会学術講演会, AC3D1-03, 2008.

[92] 竹内栄二朗, 大野和則 , 田所論, “遡及的位置推定可能なパーティクルフィルタとそのモジュール化,” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集2010, 1A2-E15(1), 2010.

[93] Kiyohiro Goto, Kazuyuki Kon and Fumitoshi Matsuno, "Motion planning of an autonomous mobile robot considering regions with

velocity constraint," Proc. of The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2010), pp.3269-3274, 2010.

[94] 清水正晴，喜多伸之，齋藤俊久，竹内栄二朗，中島裕介，武川直史，林原靖男，大和秀彰，戸田健吾，古田貴之 ，水川真，“移動ロボット用RTコンポーネントの共通インターフェース　ー次世代ロボット知能化技術開発プロジェクトにおける移動1サブWG活動報告ー,”　第27回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, 3D1-03, 2009.

[95] S. Thrun, W. Burgard , D. Fox, Probabilistic robotics, The MIT Press, 2005.

[96] Austin Eliazar , Ronald Parr, “DP-SLAM: Fast, Robust Simultaneous Localization and Mapping Without. Predetermined Landmarks,” Proc. of International Joint Conference on Artificial Intelligence, Acapulco, Mexico, August 9-15, 2003, pp.1135-1142, 2003.

[97] Kazuyuki Kon, Hiroki Igarashi, Noritaka Sato , Tetsushi Kamegawa, “Development of a Practical Mobile Robot Platform for NBC Disasters and Its Field Test,” Proc. of The 12th IEEE International Symposium on Safety Security and Rescue Robotics (SSRR2012), S6A, 2012.

[98] 製造科学技術センター，“平成11年度原子力防災支援システム開発補助事業成果報告書,” 製造科学技術センター, 2001.

[99] Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Kazuki Otake, Kazuya Yoshida, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Mineo Fukushima , Shinji Kawatsuma, “Gamma-ray irradia-tion test of Electric components of rescue mobile robot QUINCE --Toward emergency response to nuclear accident in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station in March 2011,” Conf. on 2011 IEEE International Symposium Safety Security and Rescue Robotics(SSRR2011), pp.56-60, 2011.

[100] 高橋芳浩，“第1回半導体デバイスの放射線照射効果研究会「半導体デバイスの宇宙放射線効果基礎」,” 2012.

[101] HIREC, “半導体デバイスの放射線照射効果基礎 集中基礎講座,” 第2回半導体デバイスの放射線照射効果研究会, 2013.

[102] 電気事業連合会, “放射線の種類と透過力,” [オンライン]. Available: http://www.fepc.or.jp/. [アクセス日: 5 12 2014].

[103] 新エネルギー・産業技術総合開発機構研究評価委員会, “「宇宙等極限環境における電子部品等の利用に関する」中間評価報告書,” 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2005.

[104] 柴山直樹, 赤澤宣子, 小山正博, 宮川真一, 伊藤哲正 , 上之郷一都, “民生電子部品搭載オンボードコンピュータの宇宙実証,” 三菱重工技報, vol.42, no.5, pp.242-245, 2005.

[105] United States Department of Defense, MIL-HDBK-217F, Notice2, 1995.

[106] ESCC(European Space Components Coordination), TOTAL DOSE STEADY-STATE IRRADIATION No.22900, 2010.

[107] 木本雄吾, “第1章, 第2章, RADFETによる宇宙機環境におけるトータルドーズ計測法,” 鹿児島大学 大学院理工学研究科, 博士論文, 2008.

[108] JAXA 安全・信頼性推進部, “JAXA 宇宙用部品データベース,” 宇宙航空研究開発機構, [オンライン]. Available: https://eeepitnl.tksc.jaxa.jp/jp/info/history.htm. [アクセス日: 5 12 2014].

[109] 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “宇宙等極限環境における電子部品等の利用に関する研究開発,” 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1999.

[110] 間野隆久 , 濱田彰一, “原子力防災支援システムの開発,” 日本ロボット学会誌, vol.19, no.6, pp.38-45, 2001.

[111] 濱田彰一 , 間野隆久, “欧米における原子力防災ロボットの調査報告,” 日本ロボット学会誌, vol.19, no.6, pp.2-8, 2001.

[112] Groupe INTRA, “Groupe Intra - Intervention robotique sur accident,” [オンライン]. Available: http://www.groupe-intra.com/. [アクセス日: 5 12 2014].

[113] 日本ロボット工業会, “サービスロボット事例紹介,” 日本ロボット工業会, [オンライン]. Available: http://www.jara.jp/x3_jirei/h/mitsubishi/07.html. [アクセス日: 5 12 2012].

[114] 原子力安全技術センター, “防災ロボットの開発 | 防災技術開発 | NNET,” [オンライン]. Available:

http://www.bousai.ne.jp/vis/torikumi/030301.html. [アクセス日: 5 12 2014].

[115] Kyoto University Research Reactor Institute, “Co-60 Gam-ma-ray Irradiation Facility,” Kyoto University Research Reactor Institute, [オンライン]. Available: http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/en/facilities/gamma/. [アクセス日: 5 12 2014].

[116] 日立電線, アラニン線量計「アミノグレイ」取扱説明書及び測定報告書.

[117] MS200 / LMS211 / LMS220 / LMS221 / LMS291 レーザー測定システム 技術資料, ジック株式会社, 2002.

[118] 池田 博康, “安全設計の考え方 −リスクアセスメントの基本−,” 第7回ロボット介護機器開発パートナーシップ会合, 2014.

[119] ダグ ヴォイチェサック, ジェームズ W サクストン , マギー M フィンケルスティーン, ソーリー・ワークス！: 医療紛争をなくすための共感の表明・情報開示・謝罪プログラム, 前田正一監訳; 児玉聡訳; 高島響子訳: 医学書院, 2011.

[120] Takashi Kabe, Kohichi Tanaka, Hiroyasu Ikeda , Noboru Sugimot, “Safety Principle for Service Robot,” Proc. of International Conference on Safety of Industrial Automated Systems 2007, pp.204-209, 2007.

[121] JIS Z8002:2006. 標準化及び関連活動−一般的な用語.

[122] Organisations, European Standardisation, "DIRECTIVE 2006/42/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 17 May 2006 on machinery, and amending Directive 95/16/EC (recast)," European Parliament, 2006.

[123] iRobot Corporation, “iRobot Roomba Vacuum Cleaning Robot,” [オンライン]. Available: http://www.irobot.com/For-the-Home/Vacuum-Cleaning/Roomba.aspx. [アクセス日: 5 12 2014].

[124] NEC Corporation, “クラウド連携型ロボットプラットフォーム,” [オンライン]. Available: http://jpn.nec.com/robot/. [アクセス日: 5 12 2014].

[125] 三菱重工, “三菱重工｜wakamaru [ワカマル],” [オンライン]. Available: https://www.mhi.co.jp/products/detail/wakamaru.html. [アクセス日: 5 12 2014].

[126] Honda (UK), "Homepage - Lawn & Garden -," [オンライン]. Available: http://www.honda.co.uk/garden/miimo/. [アクセス日: 5 12 2014].

[127] 綜合警備保障, "【ＡＬＳＯＫ 綜合警備保障】ホームセキュリティ・防犯対策のアルソック／ＡＬＳＯＫニュース 全国初！ＡＬＳＯＫ製自走式展望台ガイドロボットが誕生！," [オンライン]. Available: http://www.alsok.co.jp/company/news/news_release_details.htm?alpc_news.news_detail%5Bid%5D=1960. [アクセス日: 5 12 2014].

[128] CYBERDYNE, "クリーンロボット - CYBERDYNE," [オンライン]. Available: http://www.cyberdyne.jp/products/cleanrobot.html. [アクセス日: 5 12 2014].

[129] CYBERDYNE, "世界初のサイボーグ型ロボット「HAL®」 - CYBERDYNE," [オンライン]. Available: http://www.cyberdyne.jp/products/HAL/index.html. [アクセス日: 5 12 2014].

[130] 柴田崇徳, "メンタルコミットロボット・パロとロボット・セラピーの展開," 日本ロボット学会, vol.24, no.3, pp.319-322, 2006.

[131] 大和ハウス工業, "狭小空間点検ロボット moogle（モーグル）｜ロボット事業｜法人のお客さま（生活環境ソリューション）｜大和ハウス工業," [オンライン]. Available: http://www.daiwahouse.co.jp/robot/moogle/. [アクセス日: 4 12 2014].

[132] *平成20(わ)2167, 建築基準法違反, 業務上過失致死傷被告事件,* 2009.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，長きに渡り適切な御指導と御助言を頂きました京都大学工学研究科松野文俊教授，長岡技術科学大学システム安全系木村哲也准教授に心より感謝申し上げます．さらに，本論文の執筆に当たって様々な御意見，御助言を頂きました電気通信大学知能機械工学科田中一男教授に深く感謝致します．

つくばチャレンジにおいて安全確保にご尽力頂いた明星大学の飯島純一教授をはじめ，多くのつくばチャレンジ実行委員，並びに実験参加者など関係者各位に心より感謝致します．実験施設の利用機会を頂きました京都大学 高木郁二教授，佐藤信浩助教をはじめ関係者の皆様，センサデバイスの貸出などでご協力を頂きましたジック株式会社，北陽電機株式会社，セグウェイジャパン株式会社の関係者の皆様，技術的なアドバイスを頂きました東北大学 永谷圭司准教授，日本原子力研究開発機構 油谷篤志様など，関係者の皆様には深く感謝致します．

研究全体を通してよき御意見，御指導を頂きました長岡技術科学大学システム安全系 福田隆文教授，神戸大学名誉教授 高森年，芝浦工業大学電気工学科水川真教授，東北大学大学院情報科学研究科 田所論教授，神戸大学大学院工学研究科 横小路泰義教授，岡山大学工学部 亀川哲志講師，名古屋工業大学 佐藤徳孝助教，名古屋大学 竹内 栄二朗助教，日本電気株式会社 根和幸さん，元日本SGI株式会社 齋藤俊久さん，京都大学 メカトロニクス研究室のみなさん，電気通信大学 坂田百合子さん，故岩崎和子さんに深く感謝致します．

なお，本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が平成19年から平成23年にかけて実施した「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」の一環として実施されたものであり，関係者各位に感謝申し上げる．

最後に，本研究成果の発展させる機会を頂いた，日本電気株式会社 受川裕執行役員，浅井繁マネジャーに感謝を申し上げ，さらに電気通信大学大学院博士課程への進学の機会を頂いた，日本SGI株式会社 元代表取締役社長CEO和泉法夫氏，セグウェイジャパン株式会社 代表取締役社長 大塚寛氏，秋元大氏への感謝を示し，本論文の締めくくりとさせて頂きます．

関連論文と参考論文の印刷公表の方法及び時期

(1) 全著者名：五十嵐 広希，木村 哲也，松野 文俊
論文題目：移動ロボットの屋外公共空間を用いた実証実験におけるリスクマネジメント手法―「つくばチャレンジ」における事例分析―
印刷公表の方法及び時期：日本ロボット学会誌，vol.32, no.5, pp.473-480, 2014年6月
（第2章と関連）

(2) 全著者名：Kazuyuki Kon, Hiroki Igarashi, Noritaka Sato, Tetsushi Kamegawa, Fumitoshi Matsuno
論文題目：Development of a Practical Mobile Robot Platform for NBC Disasters and Its Field Test
印刷公表の方法及び時期：Proceedings of The 12th IEEE International Symposium on Safety Security and Rescue Robotics 2012 (SSRR2012), 2012年
（第3章及び第4章と関連）

(3) 全著者名：Hiroki Igarashi, Kazuyuki Kon, Fumitoshi Matsuno
論文題目：Evaluation of sensors for mobile robots based on irradiation experiment
印刷公表の方法及び時期：Proceedings of 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2012), pp.212-217, 2012年12月
（第4章と関連）

参考論文の印刷公表の方法及び時期

(1) 全著者名: Shin Hayato, Kazuyuki Kon, Hiroki Igarashi, Yuichi Ambe, Kim TaeHyon, Yamasaki Ryuta, Satoshi Toyoshima, Sohei Hanamoto, Noritaka Sato, Tetsushi Kamegawa, Fumitoshi Matsuno

論文題目: Hardware-software integration of a practical mobile robot platform

印刷公表の方法及び時期: Proceedings of 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2011), pp.1263-1268, 2011年12月

著者略歴

五十嵐 広希（いがらしひろき）

学 歴

1996年 4月	金沢工業大学 工学部 機械システム工学科 入学
2000年 3月	同上 卒業
2006年10月	電気通信大学大学院 電気通信学研究科 知能機械工学専攻 博士後期課程 入学（2009年10月～2012年3月休学）
2013年 3月	同上 単位取得退学

職 歴

2001年 6月	科学技術振興事業団 北野共生システムプロジェクト 研究補助員（2002年4月退職） オープンプラットフォーム研究用人型ロボットの構造設計などに従事
2002年 5月	日本SGI株式会社 新規事業室/ロボット事業部など （2009年5月退職） 研究開発用移動プラットフォームの企画・設計・販売 パーソナルモビリティの販売・導入支援などに従事
2009年10月	京都大学 工学研究科 機械物理学専攻 特定研究員 （2012年2月退職） 経済産業省・NEDO「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」にてコンソーシアムの運営と，移動ロボットの開発などに従事
2013年 3月	日本電気株式会社 防衛ネットワークシステム事業部 移動ロボットの開発などに従事 現在に至る